

秦巴山区浅层滑坡内动力地质成因分析

熊 炜^{1,2,3}, 刘 可¹, 范 文^{2,3}

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西南宁 530028;

2. 长安大学地质工程系, 陕西西安 710054;

3. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054)

摘 要: 以秦巴山区安康市汉滨区洪山镇淀沟浅层滑坡为例, 通过区域宏观构造、边坡微观结构、岩石微观构造等多种尺度详细剖析浅层滑坡的变形破坏特征及内动力地质成因。研究表明: 秦巴山区浅层滑坡的成因机理与内动力地质条件密不可分。滑坡多发育于软弱变质岩区, 受区域构造活动影响, 褶皱、断层等宏观构造在区内连续、交错分布, 造成岩石内部的矿物发生变形、拉长、剪断等, 形成韧性剪切带, 并产生大量微裂隙, 多期次岩脉填充交切, 使岩体性质更加劣化。当应力超过岩石强度时, 内部片层状结构发生弯曲、折断、压裂等一系列微观变形, 是变质岩主要的变形破坏方式。区内断层与滑坡斜交, 岩层及褶皱枢纽产状与滑坡坡向同向同倾, 也为滑坡的形成提供了良好的孕灾条件。这种相对脆弱的地质环境再受到人类活动和降雨等外动力因素影响, 极易引发浅层滑坡, 进而对附近居民及建筑物产生严重威胁。

关键词: 秦巴山区; 浅层滑坡; 内动力地质条件; 多尺度研究; 成因机理

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

ANALYSIS ON INTERNAL DYNAMIC GEOLOGICAL GENESIS OF SHALLOW LANDSLIDE IN QIN-BA MOUNTAIN AREA

XIONG Wei^{1,2,3}, LIU Ke¹, FAN Wen^{1,3}

(1. Guangxi Communications Investment Group Co. Ltd., Nanning 530028, Guangxi, China;

2. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Key Laboratory of Western China Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Taking the Diangou shallow landslide in Qin-Ba Mountain Area as an example, deformation destruction characteristics and internal dynamic geological genesis are analyzed in detail and multi-scale through regional macrostructure, side slope microstructure and rock microstructure. The study results show that the formation mechanism of shallow landslides in Qin-Ba Mountain Area is closely related to the internal dynamic geological conditions. Landslides usually developed in weak metamorphic areas and affected by regional tectonic activities. Folds, faults and other macro-structures were continuously and crossly distributed in the area which resulted in the deformation, elongation and shear of minerals in the rock, forming a ductile shear zone and a large number of micro-cracks. The filling and intersecting of multi-stage cracks made the rock mass more deteriorated. When the stress exceeded the rock strength, a

基金项目: 国家自然科学基金 (41502288, 41272282); 广西交通投资集团有限公司博士后基金 (2014); 中国地质调查局地质调查工作项目 (1212011220135); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (310826161015)

作者简介: 熊炜 (1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害机理与防控研究。E-mail: phdxiang@163.com

通信作者: 刘可 (1967-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事高速公路建设管理工作。E-mail: dr_lk@163.com

收稿日期: 2018-02-11; **修回日期:** 2018-04-08

吴芳编辑

series of micro-deformation occurred in the internal lamellar structure, such as bending, breaking and fracturing, which are the main deformation and failure modes of metamorphic rocks. The oblique crossing of faults and landslides, the same direction and inclination of the rock layers and folds with the slope aspect, providing a good forming condition of landslide. This relatively fragile geological environment affected by external factors, such as human activity and heavy rain, can easily lead to shallow landslides. It would be serious threats for nearby residents and constructions.

Key words: Qin-Ba Mountain Area; shallow landslide; internal dynamic geological conditions; multi-scale analysis; genesis mechanism

0 引言

秦巴山区浅层滑坡多发育于软弱变质岩区, 由薄层状岩石风化残坡积物组成, 其滑面往往位于岩体的风化残积层或坡积层内, 滑面深度通常在 10 m 范围以内, 规模多为中小型^[1]。地质灾害调查结果显示^[2~4], 陕南秦巴山区滑坡灾害占全部地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝、地面塌陷)的 90%, 而其中浅层滑坡, 数量又占到滑坡总量的 95% 以上, 其特征表现为个体规模虽小, 但量多面广, 极易造成片状及带状大面积群发破坏, 长期制约着区内经济发展^[5]。

近年来, 随着西部大开发战略的进一步实施, 秦巴山区经济建设向大规模、高质量、新技术方向发展, 面临更多的浅层滑坡危害问题, 而区内易损的承灾体和相对较低的研究程度已不能满足同类研究及工程要求^[6~8]。为此, 针对区内典型的浅层滑坡, 通过多尺度系统地揭示滑坡的内动力地质成因机理。

1 典型浅层滑坡概况

2010 年 7 月 18 日, 由于秦巴山区内突降暴雨, 导致洪山镇周边出现大量浅层滑坡, 形成洪山滑坡群。其中受灾最严重的一处是淀沟浅层滑坡, 位于陕南安康汉滨区洪山镇以南 0.6 公里的淀沟村, 省道 S310 西侧, 滑动方向与省道垂直。滑坡发生时, 前缘横穿公路, 并从另一侧滑出, 导致路东三栋房屋损毁, 两辆汽车掩埋报废, 多人受伤。

淀沟浅层滑坡滑动规模属小型, 滑体长、宽、厚分别约为 100 m、40 m、5 m。滑坡顺坡滑向 95°, 推测滑前坡度约为 34°, 坡面岩体风化堆积, 形成残坡积层, 原始坡体上由于耕种导致土体级

配不良、松散多孔。滑坡后缘陡坎出露强风化含碳云母石英片岩(见图 1), 片理面倾向与滑坡方向一致, 倾角为 42°略陡于原始坡度。



图 1 滑坡后缘基岩

Fig. 1 Bedrock of trailing edge of the Diangou landslide

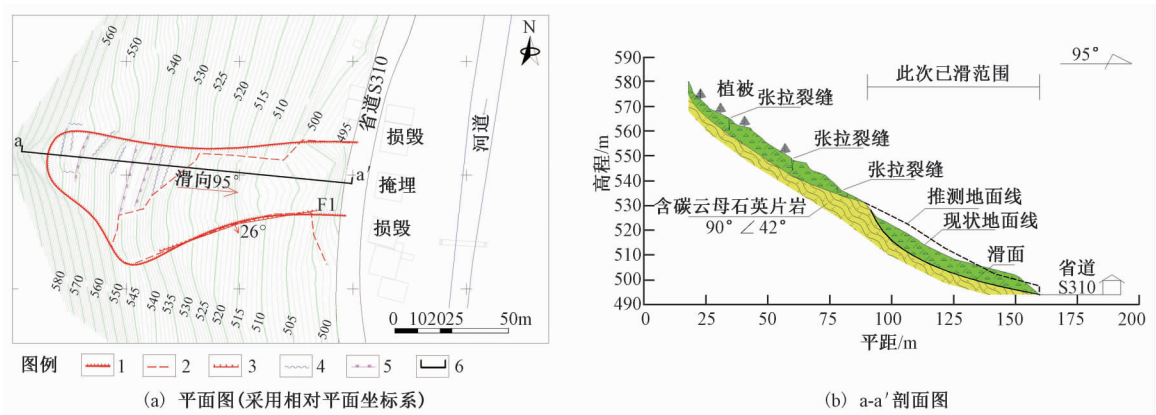
通过实地勘查测量得到滑坡的工程地质平面、剖面图如图 2 所示。

根据出露滑床形态特征可以看到, 滑面后缘发育于强风化含碳云母石英片岩内, 滑体后缘岩块从片理面脱开、滑落, 滑面抗滑性能急剧降低, 滑坡形成整体快速滑动, 按照力学模式将其定义为剧滑—平推式^[1]破坏。受基岩侵蚀面影响, 整个坡体分为上下两段, 下段已完全滑移, 而上段坡面出现大量裂缝。该滑坡主要受降雨诱发, 滑体物质主要为片岩风化堆积形成的残坡积物, 覆于顺倾向基岩之上。

2 多尺度滑坡内动力条件分析

滑坡的形成往往是内、外动力地质条件共同作用的结果。外动力地质条件是滑坡形成的诱因^[9], 能够随时空发生改变; 而内动力地质条件相对比较稳定, 是滑坡形成的先决条件。

从宏观上揭示浅层滑坡发育的区域构造、地层岩性等成灾背景; 从细观上剖析滑坡内部的小



1—滑坡周界；2—本次滑动范围；3—逆断层；4—裂缝；5—陡坎；6—剖面线

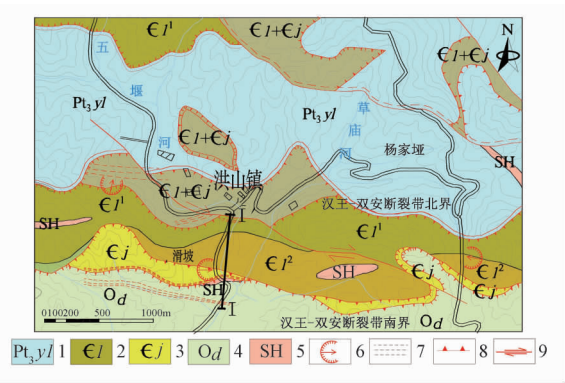
图2 滑坡工程地质图

Fig. 2 Engineering geological map of the Diangou landslide

构造、坡体结构、岩土体性质等特征；从微观上揭示滑体内部岩石矿物成分、微观构造、变形破坏模式等。

2.1 成灾背景分析

根据区域地质构造背景，滑坡总体上位于秦岭微板块中的紫阳—平利逆冲推覆构造带^[10-12]，而滑坡正好处在汉王—双安断裂带^[13]内（见图3），在滑坡附近，断裂带走向近东西向，产状大致为 $5^{\circ}\angle 70^{\circ}$ ，受南北板块多期次挤压，东西向滑移拉伸，该范围内岩体揉皱破碎，并发育断层泥、断层碎裂岩等，是典型的构造强烈变形区，也是区内岩体变形、破碎的主要动力来源。



1—耀岭河组；2—鲁家坪组；3—箭竹坝组；4—洞河组；5—二长岩；6—滑坡；7—韧性剪切带；8—逆断层；9—平移断层

图3 滑坡区域地质构造图（据1:5万地质图修改）

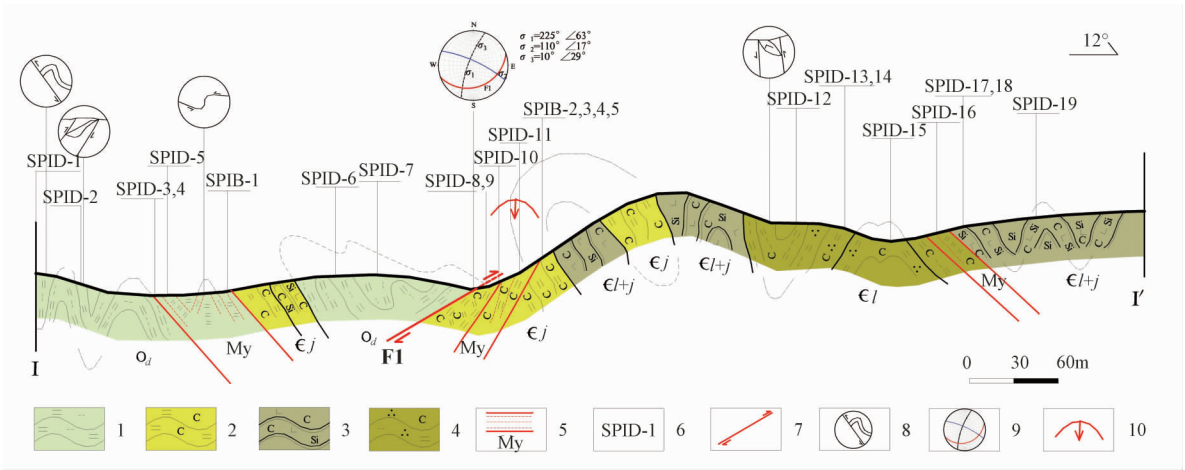
Fig. 3 Geological structure map of the landslide area (Modified after 1:50000 geological map)

区域内出露的主要地层岩组由新到老包括：奥陶系洞河岩组（滑坡以南）、寒武系鲁家坪及箭

竹坝岩组、青白口系耀岭河岩组（滑坡以北）（见图3）。其中，奥陶系洞河岩组主要包括含碳绢云母片岩、绿泥钠长绢云母片岩、钙质绢云母片岩，该岩组在滑坡以南大范围出露，但滑坡范围内已完全被剥蚀。寒武系地层与此滑坡关系最为密切，包括两个岩组：上部箭竹坝岩组主要为灰黑色泥灰岩夹碳质片岩，原始构造样式包括顺层掩卧褶皱及褶皱理、顺层向韧性剪切带及顺层劈理等，后期继续受构造营力影响，区域内呈透镜状、香肠状展布，岩性软弱、结构破碎、变形强烈，以致滑坡范围内该层及上覆岩层均已风化为残坡积物，为滑坡提供了基本物源；下部鲁家坪岩组主要为黑色含碳云母石英片岩，受岩层之间逆冲断层改造，构造片状接触，是此滑坡滑床出露的主要岩层。青白口系耀岭河岩组主要为灰绿色绿泥石英片岩夹薄层状硅质岩、为火山沉积岩建造基性变质，是研究区内重要的原地系统岩层。此外，通过区域地质灾害调查统计发现^[2]，区域内滑坡多发育于寒武系变质岩岩层中，说明构造活动强烈和岩性软弱、易风化的地质特性共同决定了秦巴山区滑坡易发的形成背景。

2.2 成灾条件分析

为了剖析地质环境条件与滑坡灾害的关系，沿南北向公路的切坡面，开展了长约942 m的基础地质剖面测量（见图3中I-I'剖面、图4）。由于受构造活动影响，岩性在小范围内交叠糅杂，同一小剖面上多种岩性反复交替出现。剖面上复式褶皱和韧性剪切带极为发育，并由此产生多条节理、断层。



1—云母片岩; 2—碳质片岩; 3—含碳硅钙质板岩; 4—含碳云母石英片岩; 5—韧性剪切带;
6—采样位置及样品编号; 7—断层; 8—褶皱变形; 9—共轭节理赤平投影; 10—滑坡

图 4 实测地质剖面图
Fig. 4 Measured geological profile

(1) 褶皱

滑坡所在区域南北向挤压构造活动强烈, 形成多期次、多级别的构造褶皱, 使片岩片理面 S_n (n 代表期次) 变形、开裂、贯通, 形成了一系列不同规模的向斜—背斜交错组合, 局部形变量大的部位甚至形成顺层掩卧褶皱和流塑状褶皱, 而原生的 S_0 层理在区内基本未见, 均被片理面彻底置换。除构造褶皱以外, 区内断层带或韧性剪切带两侧具有相对位移的区段由于拖拽、滑移作用而形成的次生褶皱也极为发育。褶皱的弯曲、拉伸变形使岩体中矿物定向排列, 产生塑性变形, 形成新的裂隙, 劣化了岩体性质, 并且褶皱造成片理面或结构面之间不均匀形变, 使岩体中片理面或结构面贯通, 产生位错、脱空, 增加了岩体与空气的接触面积, 加速岩体风化, 形成更多滑坡物源。

沿褶皱走向中曲率最大、最容易脱开的位置即为枢纽, 岩体中结构面产状通常也受控于褶皱枢纽。将现场量测的滑坡周围 34 组褶皱枢纽的产状进行下半球极射赤平投影, 得到极密枢纽产状约为 $91^\circ \angle 42^\circ$ (见图 5), 与此滑坡及滑床岩层产状一致, 为同向顺层倾伏褶皱。

(2) 韧性剪切带

地质剖面上共出露了 3 条近东西走向的韧性剪切带 (见图 3、图 4)。其中, 与滑坡关系最为密切的是中间一条, 带体宽度约 20 m, 产状为 $159^\circ \angle 36^\circ \sim 64^\circ$, 呈缓波状, 韧性剪切带中主要出露动

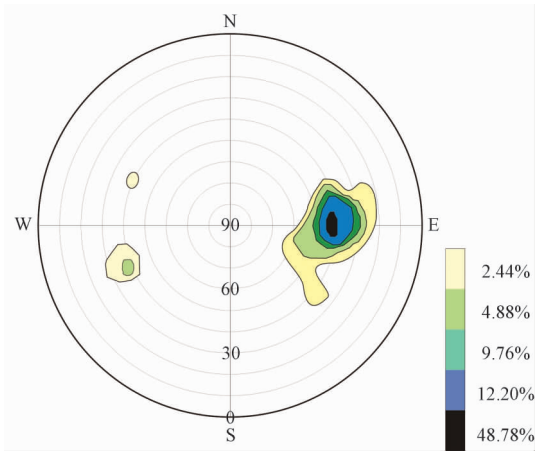


图 5 褶皱枢纽等密图
Fig. 5 Contour diagram of fold hinge

力变质岩, 以构造片岩和糜棱岩为主, 显微镜下可以看到岩体中的云母、碳质及石英颗粒等矿物都发生定向拉伸 (见图 6) 或弯曲, 说明岩体在长期历史营力作用下沿东西方向发生了较大的相对变形。从物质间作用力来看, 这种矿物的定向分布也极易引起岩石体内产生应力分布不均或应力集中, 同时矿物颗粒及胶结基质内也会产生大量定向微裂隙, 这都有助于劣化岩体性质。此外还有 2 条倾向北东向的韧性剪切带位于滑坡影响范围以外, 对该滑坡的形成作用较小。

(3) 断层

受汉王—双安断裂影响, 剖面上出露了多条不同期次的断层, 而其中与此滑坡关系最为密切

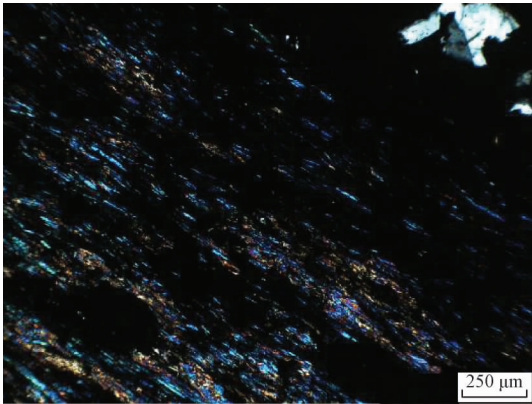


图6 矿物被拉长 (SPIB-4, 正交偏光)
Fig. 6 Stretched minerals (SPIB-4, crossed polar)

的是滑坡南缘的逆断层 F1 (见图 4), 产状 $161^{\circ} \angle 27^{\circ}$, 断层两侧拖褶皱发育, 拖褶皱轴面指示了上盘、下盘的相对位移。断层两侧构造劈理化也较为强烈, 现场对露头中出现的 11 个劈理产状进行实测, 产状倾向为 $4^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 倾角为 $69^{\circ} \sim 81^{\circ}$, 与滑坡斜交, 故劈理决定了滑坡右边界。另外, 在断层裂隙中可见间断石英脉, 厚度约为 $1 \sim 9 \text{ cm}$, 产状为 $91^{\circ} \angle 46^{\circ}$ 。受断层影响, 韧性剪切带中的岩体强烈破碎, 生成碎裂岩等, 说明该断层经历了压—张—压—张多期次构造活动^[14~15]。

(4) 节理

通过统计, 剖面上南北走向的节理较多, 走向集中在 $351^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的范围。根据实测滑坡附近的 89 条节理, 倾向分布范围 $59^{\circ} \sim 129^{\circ}$, 倾角分布范围 $21^{\circ} \sim 69^{\circ}$, 极密产状为 $96^{\circ} \angle 50^{\circ}$ (见图 7), 也与滑坡滑动方向一致, 由此可得, 发育的顺倾向节理也是控制滑坡的重要因素。

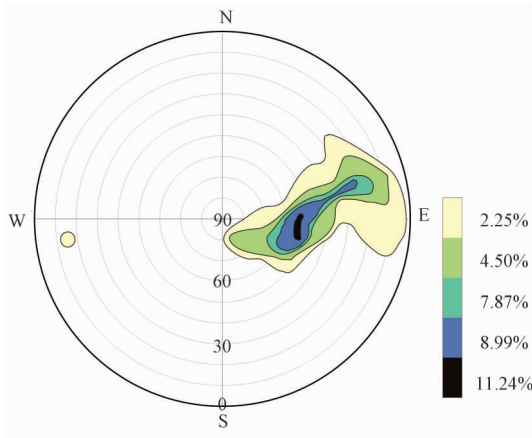


图7 节理等密图
Fig. 7 Contour diagram of joints

2.3 岩石微观变形分析

(1) 岩石微观构造

通过岩石矿物鉴定, 滑坡滑床出露的变质岩石中大部分含有石英、云母等矿物成分, 片理、劈理构造发育。借助于显微镜可以看到白云母等应力矿物的环状消光 (见图 8a), 多数还具有至少两期次褶皱 (见图 8b), 石英矿物被拉长、压扁, 在早期褶皱中甚至还出现了重结晶现象 (见图 6)。部分云母石英片岩试件中, 还存在两期相互交错的片理结构 (见图 8c)、叠加褶皱 (见图 8d)、多方位压力影 (见图 8e) 以及波状消光、旋转碎斑等 (见图 8f)。岩体中的微观现象都是历史营力发生改变时在岩石体内留下的印记, 表明该区域曾经历了多期次的、不同规模的构造活动, 岩石中保留的多种形式的微观构造, 也导致了岩石内部的矿物分布表现出不均匀、各向异性的特征, 在不同内外场环境中矿物对不同应力的反馈作用也均各异, 形成岩石体内应力分布不均和应力集中, 导致岩体更易受外环境影响发生风化堆积。

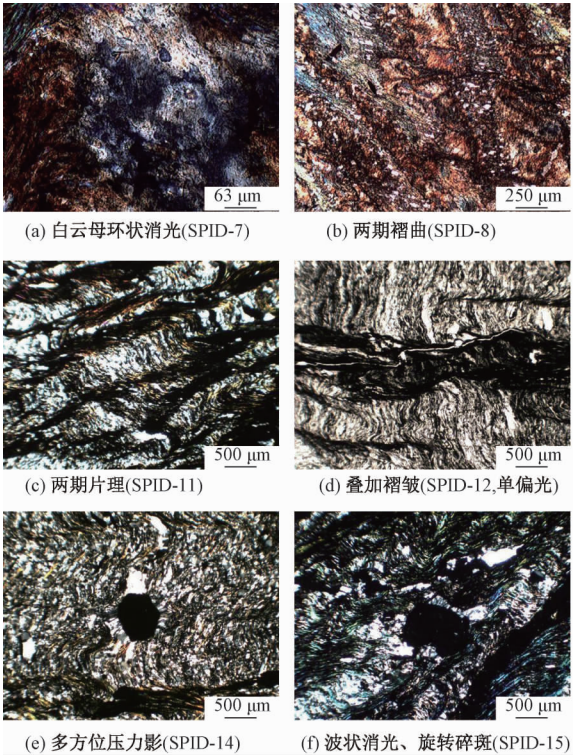


图8 岩石的微观构造 (正交偏光)
Fig. 8 Microscopic structure of rocks (crossed polar)

(2) 岩脉

在调查过程中, 滑坡附近主要可见两大类岩脉: 出露最多的是方解石脉和石英脉, 矿物成分

主要为方解石或石英,其含量超过 90%,此外还存在云母类和铁质等次要矿物。其次还包括有二长岩脉,其矿物成分主要包括斜长石和钾长石,其含量均达到 30% 以上,还含有少量石英、云母类矿物,区内常见于经历了强烈的塑性变形的构造带,如二长质糜棱岩,出露宽度在 11 ~ 15 m 之间,长度一般大于 30 m。区内发现的岩脉一般都经历了多期次改造,根据交切关系得出:与片理(劈理)平行者生成较早,斜交者生成较晚,并切割早期节理。

岩脉的形成也说明在历史构造活动过程中,岩体内产生了大量与大主应力成一定交角的压剪裂隙或张拉裂缝,后被脉体充填,其历史营力发生变化、岩体性质不均也会导致岩体易风化、破碎,并且从岩脉的交切关系也能推演历史构造活动演化规律。

2.4 岩石变形破坏的力学分析

(1) 力学性质

通过对滑床出露的鲁家坪组含碳云母石英片岩进行水理力学性质试验,得到其软化系数在 0.4 ~ 0.6 之间(见表 1),按工程性质分类,属于软质变质岩。岩样在吸水后具有一定膨胀性,主要是由于矿物中包括少量蒙脱石、高岭石、蛭石等粘土矿物,通过试验测定,径向膨胀率均值为 0.24%,轴向膨胀率均值为 0.21%(见表 2)。此外,岩块在实验室环境下虽然难以人工崩解,但在干湿反复循环多次后,强度明显下降,循环 24 次后干燥单轴抗压强度衰减至初始状态的 78.58%(见表 3)。

表 1 岩样软化性质试验结果表

Table 1 The results of rock softening property test					
组号	状态	片理面 关系	单轴抗压强度/MPa		软化 系数
			试验值	均值	
1	1	干燥	垂直	27.1	28.6
	2				
	3				
2	4	饱和	垂直	18.9	17.2
	5				
	6				
	7				
3	8	干燥	平行	22.0	26.2
	9				
	10				
4	11	饱和	平行	11.8	10.6
	12				

通过以上试验还可见岩石强度相对离散,在

表 2 岩石自由膨胀率试验结果表

Table 2 The results of rock free expansion rate test						
组号	浸水前尺寸/mm		浸水后尺寸/mm		径向膨胀率 /%	轴向膨胀率 /%
	边长	高度	边长	高度		
1	50.12	98.65	50.25	98.85	0.259	0.202
2	50.78	100.43	50.91	100.66	0.256	0.229
3	51.02	99.98	51.13	100.18	0.215	0.200
4	49.67	101.34	49.79	101.54	0.241	0.197

表 3 岩石强度劣化试验结果表

Table 3 The results of rock strength degradation test				
条件	组号	单轴抗压强度/MPa		与初始强度 比值
		试验值	均值	
初始	1	27.2	28.63	100
	2	22.2		
	3	36.5		
循环 6 次	4	25.3	26.53	87.19
	5	30.2		
	6	24.1		
循环 12 次	7	22.4	24.47	82.65
	8	26.7		
	9	24.3		
循环 18 次	10	25.7	22.6	80.33
	11	22.3		
	12	19.8		
循环 24 次	13	21.0	21.17	78.58
	14	18.8		
	15	23.7		

相同条件下主要取决于岩体微观下的矿物含量、微裂隙的发育和组合情况。

(2) 变形破坏分析

岩石宏观上的变形破坏均是微观变形的集合体现^[16-17]。采用电子显微镜研究含碳云母石英片岩的微观结构,试验前呈片层状结构(见图 9);试验破坏后,破坏面上表现出强烈的弯曲揉皱现象,局部产生大量错断、弯折、压散现象(见图 10a、10b),表面存在较多松散颗粒。而其中较坚硬的矿物颗粒,如石英颗粒仍保持了相对完整的形态(见图 10c),颗粒周围的胶结基质表面却出现破损微裂隙(见图 10d)。

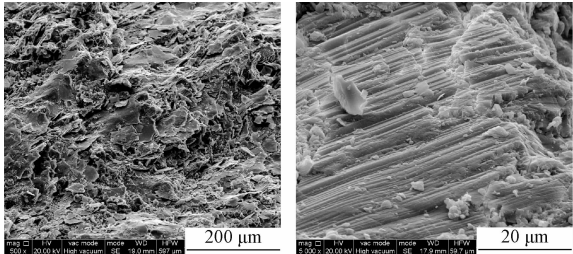


图 9 变形破坏前微观形态

Fig. 9 Morphology before deformation and failure

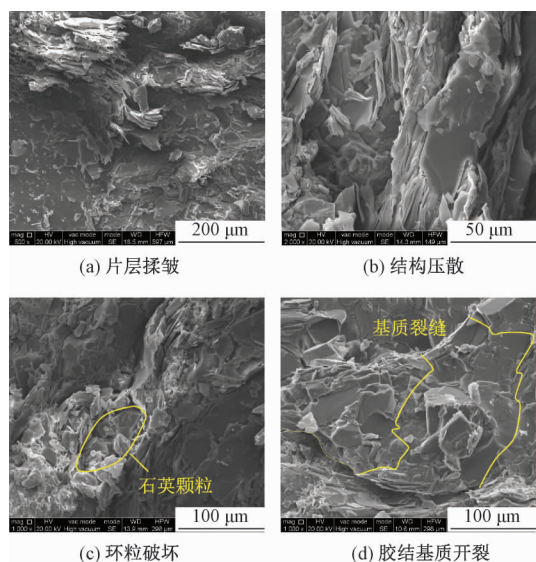


图 10 岩石变形破坏微观模式

Fig. 10 Rock microscopic deformation and failure mode

3 滑坡成因机理分析

该滑坡所处地层主要为寒武系鲁家坪岩组和箭竹坝岩组,以性质软弱的云母石英片岩为主。滑坡位于汉王—双安次级断裂带内,强烈的构造活动导致岩体变形破碎,形成大量褶皱、韧性剪切带,尤其是滑坡位于南偏东倾向的韧性剪切带中,原岩形成后受到多期次强烈的构造改造作用,形成较大的变形和众多脱空和裂缝,后期又逐渐被充填,形成了先期的石英脉和二长岩脉,此后又经历了变形、破碎,局部岩体糜棱岩化,岩体中保留了岩脉交切关系,并从镜下看到矿物拉长、消光、褶皱、旋转碎斑、压力影等一系列塑性变形特征,后期发育的张、剪裂隙再次被碳酸盐侵入形成方解石脉。如此形成的变质岩内部结构复杂,矿物分布不均,在多维度多场耦合条件下极易风化,形成滑坡所必须的基本物质条件。

在造山运动过程中,岩石除了发生塑性变形以外,当应力足够大,且韧性变形发展到一定阶段,继续会产生脆性断裂,如与滑坡斜交,位于滑坡南缘的 F1 断层,以及形成许多东西方向与坡体同倾的次一级小错断,造成岩体破碎,易风化堆积,为滑坡形成提供了良好的孕灾环境。

坡面风化堆积土体在人类活动影响更加下松散多孔,加之坡表缺少植被,不能起到饱水及防冲刷作用,在暴雨及长历时连阴雨时期,雨水下

落,坡表土体被击溃,一部分雨水汇集形成地表径流,冲刷坡表土体,并带走细粒松散物质,并在坡表产生顺坡向的拖拽作用;另一部分雨水通过土体中的孔隙下渗,坡体抗剪强度逐层降低,产生蠕滑拉裂,裂缝又成为入渗水的良好通道,加速了岩土体变形,使坡体易发生整体失稳。

4 结论

通过对秦巴山区典型的浅层滑坡详细剖析得出以下结论:

(1) 滑坡滑床出露寒武系鲁家坪组含碳云母石英片岩,滑体为箭竹坝组碳质片岩残坡积物,原岩岩性软弱,复杂不均,受外环境影响极易风化破碎,为滑坡形成提供了物质基础。

(2) 宏观上滑坡位于汉王—双安次级断裂构造带,构造活动多期次交错,形成大量断层、褶皱及韧性剪切带,细观上使岩体断裂、脱开,微观上矿物结构变形强烈,破坏了岩体完整性,加速了岩体的风化堆积。

(3) 与滑坡斜交的 F1 断层,与滑坡坡向同向同倾的褶皱枢纽和节理面,都为滑坡的形成提供了良好的孕灾环境。

(4) 滑床出露的含碳云母石英片岩属软质变质岩,强度低,受水影响易软化,吸水后略有膨胀性,强度随干湿反复循环而显著降低,是区内重要的易滑地层。

(5) 含碳云母石英片岩微观破坏模式主要包括片层状结构弯曲、折断、压散、环粒破坏以及基质开裂等。

参考文献/References

- [1] 熊炜, 范文. 秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究 [J]. 灾害学, 2014, 29 (1): 228 ~ 233.
XIONG Wei, FAN Wen. Disaster law of shallow landslide in Qin-ba mountain region [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29 (1): 228 ~ 233. (in Chinese with English abstract)
- [2] 熊炜. 秦巴山区软弱变质岩浅表层滑坡成因机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
XIONG Wei. Study on the cause mechanism of shallow landslide of weak metamorphic in the Qin-ba Mountain Region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [3] 范立民, 何进军, 李存购. 秦巴山区滑坡发育规律研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15 (1): 44 ~ 48.

- FAN Limin, HE Jinjun, LI Cungou. Study on development patterns of landslide in Qinling-Bashan Mountains [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15 (1): 44 ~ 48. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王雁林. 陕南地区滑坡灾害气象预报预警及其防范对策探析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16 (4): 345 ~ 349. WANG Yanlin. Study on the early-warning and prediction of land-slide hazards and countermeasures in the southern Shaanxi Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16 (4): 345 ~ 349. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陕西省减灾协会. 秦巴山区山地自然灾害 [M]. 西安: 世界图书出版公司, 1999. Shaanxi Provincial Institute for Disaster Reduction. Mountain natural disasters in Qinba Mountain [M]. Xi'an: World Publishing Company in Xi'an, 1999. (in Chinese)
- [6] 吴树仁, 张永双, 韩金良, 等. 三峡水库引水工程秦巴段工程地质条件研究 [J]. 地球学报, 2006, 27 (5): 487 ~ 494. WU Shuren, ZHANG Yongshuang, HAN Jinliang, et al. The engineering geological conditions of the Qingling-Dabashan Sector of the water diversion project from the Three Gorges Reservoir to the Yellow River [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (5): 487 ~ 494. (in Chinese with English abstract)
- [7] 石玲, 张永双, 石菊松. 三峡引水工程秦巴段主要地质灾害及其工程影响 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (2): 212 ~ 219. SHI Ling, ZHANG Yongshuang, SHI Jusong. Surface geohazards at Qinling-Daba Mountain and impact on Three Gorges water diversion project [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (2): 212 ~ 219. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杜继稳. 降雨型地质灾害预报预警 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. DU Jiwen. Forecasting and warning of rainfall type geological disaster [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [9] Seok K M, Onda Y, Uchida T, et al. Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: case study including an experimental sandy slope with artificial rainfall [J]. CATENA, 2018, 161: 50 ~ 62.
- [10] 张二朋. 秦巴及邻区地质 - 构造特征概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. ZHANG Erpeng. Geological and tectonic features in Qinba and its adjacent areas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. (in Chinese)
- [11] 杨志华. 秦岭造山带的构造格架和构造单位新划分 [J]. 地质科技情报, 1996, 15 (3): 43 ~ 48. YANG Zhihua. Tectonic pattern and redivision of tectonic units of the Qinling Orogen [J]. Geological Science and Technology Information, 1996, 15 (3): 43 ~ 48. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang G W, Xiang L W, Meng Q R. The Qinling orogenic and intracontinental orogenic mechanism [J]. Episodes, 1995, 18 (1 ~ 2): 36 ~ 39.
- [13] 张国伟. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. ZHANG Guowei. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [14] 郭长宝, 张永双, 王涛, 等. 南北活动构造带中段地质灾害与重大工程地质问题概论 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (5): 707 ~ 722. GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, WANG Tao, et al. Discussion on geological hazards and major engineering geological problems in the middle part of the north-south active tectonic zone, China [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (5): 707 ~ 722. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吴中海, 周春景, 谭成轩, 等. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征 [J]. 地质力学学报, 2016, 22 (3): 379 ~ 411. WU Zhonghai, ZHOU Chunjing, TAN Chengxuan, et al. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22 (3): 379 ~ 411. (in Chinese with English abstract)
- [16] 任建喜, 葛修润, 杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展细观机理 CT 实时试验 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (2): 130 ~ 133. REN Jianxi, GE Xiurun, YANG Gengshe. CT real-time testing on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22 (2): 130 ~ 133. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈文玲, 赵法锁, 弓虎军. 基于微观试验的云母石英片岩蠕变损伤变量研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (S1): 2661 ~ 2666. CHEN Wenling, ZHAO Fasuo, GONG Hujun. Study of creep damage variable of mica-quartzose schist based on microscopic test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S1): 3578 ~ 3584. (in Chinese with English abstract)