

DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0066  
CHEN Wenwu, LIU Wei, LIN Gaochao, et al. Study of the mechanical characteristics of slip zone soils sampled from loess-mudstone interface[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 593–601. [ 谔文武, 刘伟, 林高潮, 等. 黄土-泥岩接触面滑坡滑带土力学特征研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 593–601. ]

# 黄土-泥岩接触面滑坡滑带土力学特征研究

谔文武<sup>1,2</sup>, 刘 伟<sup>1,2</sup>, 林高潮<sup>1,2</sup>, 孙冠平<sup>1,2</sup>, 吴玮江<sup>3</sup>  
(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 滑带土是滑坡形成过程中形成的一层结构性较差的土体,是滑坡的重要组成部分。其物理力学性质、微观结构与滑坡的形成以及后期运动特征密切相关。黄土-泥岩接触面滑坡是按照滑坡地质成因划分的一种上层黄土、下层泥岩的具有“双层异质”结构的滑坡。此类滑坡由于在滑动中具有缓动低速的特点,往往早期不易被发现,发现时已造成了严重的危害。采用 GDS 三轴仪对天水地区花南村滑坡、半山村滑坡和咀头村滑坡三个黄土-泥岩接触面滑坡的滑带土力学性质进行研究,结合滑带土微观结构特征,分析黄土-泥岩接触面滑坡滑带土的力学变化特征及其变形内在机理。研究发现:滑带土中大量存在被黏土颗粒包裹的大颗粒,这些大颗粒在滑带土变形过程中经历错位、滑移等过程后,大颗粒进一步滑移受到黏土质限制,导致黄土-泥岩接触面滑坡滑带土在宏观上表现出应变硬化的典型特征。此外,剪切中孔隙水压力无法及时消散也是此类滑坡变形的重要特征之一。应变硬化造成滑带土在滑动中强度未出现残余值而导致滑坡处于持续运动中,能量的释放方式属于缓慢释放型。因此该类滑坡滑动具有缓动低速的特性。

**关键词:** 滑带土;黄土-泥岩接触面滑坡;力学特征;三轴试验;应变硬化

**中图分类号:** TU43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2017)03-0593-09

## 0 引言

滑坡的发生往往受控于滑带土的物理力学性质。由于滑带土的物质成分、微观结构和赋存环境一直随滑坡的运动变形处于变化中,使得滑带土的性质与滑体和滑床岩土体性质存在较大差异。因此,研究滑带土的基本性质对于认识滑坡的形成和变形特征很重要。滑带土力学特征方面,韩爱果等<sup>[1]</sup>基于重力压密原理通过“陈氏加载法”对某大型滑坡滑带土进行流变特性研究,发现滑带土黏滞系数随正应力增大而增大。蒋秀姿等<sup>[2]</sup>利用直剪蠕变试验对滑带土的蠕变特性进行研究,对比滑带土残余强度与长期强度的联系,发现应力状态控制滑带土的蠕变特性。黄斌等<sup>[3]</sup>通过常规三轴固结排水试验对不同初始饱和度的滑带土力学特性进行

研究,发现初始饱和度影响滑带土强度。滑带土残余强度方面,田斌等<sup>[4]</sup>在分析滑带土结构强度特征时明确了滑带土残余强度和再生强度不同的使用场合。也有学者通过现场大剪试验和室内固结快剪试验确定了滑带土再生强度、现场强度和固结快剪强度,通过统计试验结果发现粗粒含量、塑性指数以及含水量对于残余剪切强度等均有影响<sup>[5]</sup>。Carey 等<sup>[6]</sup>通过三轴试验研究滑带土渐进性破坏,发现原状样表现为脆性破坏,重塑样表现为塑性破坏。残余强度对滑坡的复活具有重要作用,Bishop 等<sup>[7]</sup>和 Townsend 等<sup>[8]</sup>发现滑带土残余强度与滑带土结构和应力历史联系较小,然而,土体中固、液、气三相组成对残余强度的变化仍会产生一定影响<sup>[9-10]</sup>。滑带土中水的作用对残余强度影响较大,Vithana 等<sup>[11]</sup>研究超固结比对滑带土强度的影响,发现黏

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-02-27  
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB744701); 中国地震局黄土地震工程重点实验室开放基金项目(KLLEE-17-004); 国家自然科学基金项目(41362014); 甘肃省科学院项目(2015jk-01)资助  
作者简介: 谔文武(1966-),男,河南信阳人,教授,2004 年在兰州大学获得博士学位,从事工程地质与地质灾害、文物保护等相关领域的研究。E-mail: sungp@lzu.edu.cn.

土的排水剪切强度独立于应力历史,对比固结比对于高液限黏土和黄土的剪切行为以及剪切强度的影响时发现,不同固结比影响重塑滑带土峰值强度,对残余强度影响较小。Skempton<sup>[12]</sup>发现土体含水量增多与土体软化和剪胀作用相对应,软化作用后土的有效黏聚力降低,但黏土颗粒并未产生定向排列。张卢明等<sup>[13]</sup>基于饱和-非饱和渗流及数值计算,探讨了降雨入渗和地下水位波动条件下滑坡体和滑带土含水量与基质吸力的变化规律,发现滑坡体和滑带土基质吸力受到降雨强度等影响较为显著,降雨强度间接影响滑坡稳定性。此外,龙建辉等<sup>[14]</sup>研究黄土滑坡滑带土物理特性时发现,滑带土的物理性质以及微观结构特性等明显与滑床不同,可将这些不同性质作为现场鉴别滑动面的标志。谌文武等<sup>[15]</sup>通过三轴试验发现天水黄土结构性差异对于诱发黄土滑坡敏感性程度不同,原状黄土由于其独特的原始结构而具有较强的应变软化特性。吴玮江等<sup>[16]</sup>从地貌学角度对于黑方台黄土滑坡的形成过程以及运移特征进行分析介绍,从滑带土特性中反演滑坡的形成过程。

滑带土在滑坡滑动过程中经历了反复挤压、揉搓后,不仅物理力学性质较滑坡体和滑床发生了较大变化<sup>[17]</sup>,微观结构方面也发生了显著变化<sup>[18]</sup>。滑带土的微观结构变化对于强度的影响显著,国内外学者均观察到滑带土在剪切作用后产生了明显的定向排列,且发生了颗粒破碎效应<sup>[19-21]</sup>。王洪兴等<sup>[22]</sup>研究滑带土黏土矿物定向性以及它对滑坡的作用时,基于滑带中黏土矿物进行定量计算,得出滑带中黏土矿物的定向度为中等的结论。宋丙辉等<sup>[23]</sup>基于分形理论对滑带土的微观结构进行研究,结果表明孔隙形态分维数越小,孔隙比越大,土体强度越低。李江等<sup>[24]</sup>在研究滑带土软化过程中微观结构的变化时发现,滑带土饱水软化后,内部结构变疏松,颗粒间连接方式由面-面接触转化为边-边接触和面-边接触。陈剑等<sup>[25]</sup>研究天然滑带土基本性质和微观结构时,发现滑带中含有大量的膨胀性黏土矿物,滑带土具有软弱结构和较高的孔隙比,表明滑带土经历了膨胀和颗粒重新排列两个过程。由以上研究结果可知,研究滑带土力学特性,结合滑带土微观结构方面发生的变化,可更加全面、系统地认识滑坡的变形及破坏特征。

目前已有研究多集中于对单一物质组成的滑带土性质研究,而对于多种物质组成的混合滑带土的物理力学性质方面的研究较少。黄土-泥岩接触面

滑坡滑带土是由泥岩上部的强风化泥岩和上覆黄土层混合组成的特殊土体,开展此类滑带土物理力学性质以及微观结构方面的研究对于认识物质成分复杂的滑带土力学变化特征至关重要,同时,也是认识黄土-泥岩接触面滑坡形成和复活变形特征的重要途径,对于此类滑坡的防治工作具有较强的指导意义。

本文利用三轴试验对天水花南村滑坡、半山村滑坡和咀头村滑坡滑带土的力学特征进行研究,结合滑带土微观结构对滑带土的力学变化特征进行深入分析,为该类型滑坡的滑动机理研究提供指导。

## 1 滑坡概况

本研究中所选取的花南村滑坡、半山村滑坡和咀头村滑坡位于甘肃省天水市麦积区(图1)。吴玮江等<sup>[26]</sup>按照滑体岩土组成以及滑面发育位置将黄土滑坡分为黄土层内滑坡、黄土接触面滑坡、黄土-泥岩接触面滑坡和黄土-泥岩切层滑坡四种类型。结合该滑坡分类方法以及花南村滑坡、半山村滑坡和咀头村滑坡的岩土组成,可判定以上三处滑坡均属于黄土-泥岩接触面滑坡。



图1 研究区滑坡位置

Fig. 1 Map showing the location of landslides in Maiji District of Tianshui Prefecture

花南村滑坡位于天水市麦积区花南村南侧。该滑坡为发生于2014年3月的新滑坡。滑坡总长度95 m,宽度130 m,滑体厚度5~10 m,面积 $1.24 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积约 $1.24 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。滑坡发生后摧毁了310国道K1428处挡土墙,并且滑坡堆积物堆积于路面上,造成长约200 m的路面一侧被滑坡堆积物损毁。

花南村滑坡后缘处的“圈椅状构造”较为明显,且后缘处发育有多条与滑动方向垂直的拉张裂隙。

裂隙宽度 0.32 ~ 1.16 m，长度 5.0 ~ 21.5 m，不同的裂隙将后缘黄土层切割成参差不齐的块体。滑坡前缘较宽，后缘宽度较窄，从后缘沿主滑方向宽度逐步增加。后缘高程为 1 210 m，剪出口位置高程 1 170 m，前后缘高差 40 m，地表平均坡度约为 16°，主滑方向 290°。调查发现该滑坡属于黄土-泥岩接触面滑坡新滑坡。

半山村滑坡位于麦积区半山村，该滑坡属于复合型黄土-泥岩接触面滑坡。滑坡总长度 600 m，宽度 700 m，滑体厚度 6 ~ 12 m，面积  $4.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，体积  $3.78 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。滑坡活动中损毁当地居民位于滑坡体上的苹果树地，剪出口位置数十棵苹果树随滑体滑入河道中，损失巨大。

咀头村滑坡位于麦积区咀头村北侧 1 km 处，属于黄土-泥岩接触面老滑坡。滑坡总长度 280 m，宽度 140 m，滑体厚度 5 ~ 10 m，面积  $3.92 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，体积  $2.94 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。滑坡活动中损毁了位于滑坡体上的苹果树地，剪出口位置处的村村通水泥路伴随滑坡滑动形成宽约 10 ~ 20 cm 的裂缝，损毁长度近 100 m。

2 试验方案

2.1 试样

为探讨黄土-泥岩接触面滑坡滑带土的力学特征，选取上述三个滑坡滑带土作为研究对象。由于滑坡体后部上覆黄土较厚，而剪出口位置滑坡堆积物富集，故本研究中的试样均取自主滑方向前缘位置。由图 2 ~ 4 可知，滑坡前缘剪出口位置覆盖层较薄，试验中所用试样均在滑坡前缘剪出口位置通过探坑法进行取样。将前缘位置的上覆土层去除，用铲子开挖直径为 1.0 m 的垂直探坑，在探坑侧壁新鲜面上挖取滑带部分试样，装入自封袋中，

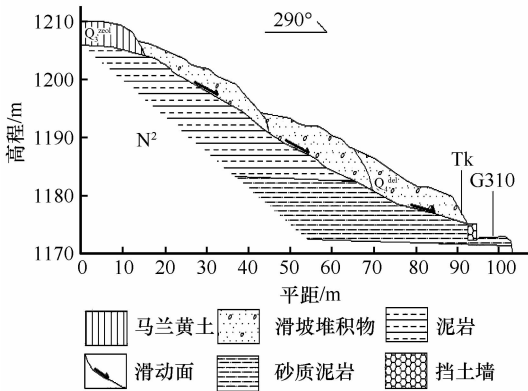


图2 花南村滑坡剖面

Fig. 2 The profile of Huanancun landslide

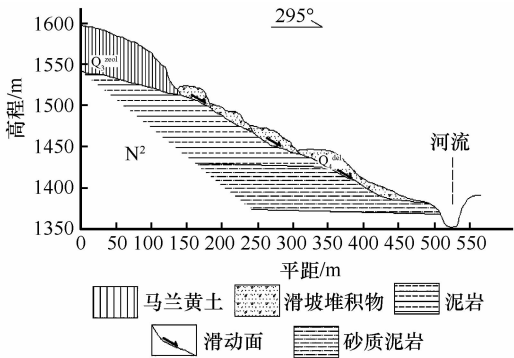


图3 半山村滑坡剖面

Fig. 3 The profile of Banshancun landslide

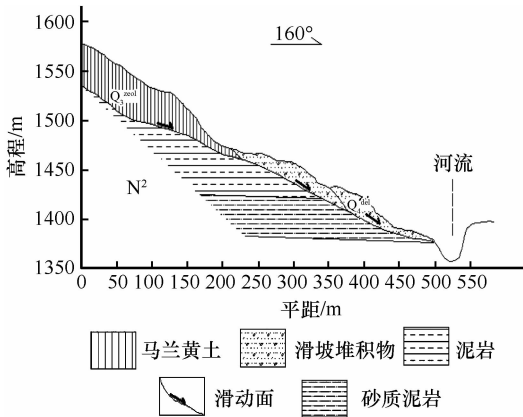


图4 咀头村滑坡剖面

Fig. 4 The profile of Zuitoucun landslide

及时密封。花南村滑坡、半山村滑坡以及咀头村滑坡滑带土试样分别编号为 HNC、BSC、ZTC，并对试样进行简单描述。

花南村滑坡滑带土处于浸水饱和状态，宏观上呈暗红色。滑带位置一直有地下水缓缓从剪出口渗出。滑带中夹有少量的薄层红色泥岩。半山村滑坡滑带土为黄土与全风化泥岩的混合物，含水量较大的滑带土颜色呈暗红色，厚度约为 0.5 ~ 2.0 m。滑坡中部出露的滑带土已被风干，呈灰白色，形状呈鳞片状，薄片厚度约为 3 ~ 10 mm，滑带土与底部泥岩接触界限较为清晰。滑带土与泥岩接触处可在底部泥岩上观察到少量擦痕，擦痕表面可见零散分布的黑色氧化物。咀头村滑坡滑带土含水量较花南村滑坡及半山村滑坡滑带土小，颜色相对较浅。滑带中风化泥岩碎屑物相对较少，较为均匀。黄土-泥岩接触面滑坡滑带土位于上覆黄土和下伏泥岩接触位置，新近系泥岩沉积后表层受到风化影响，后期黄土沉积在风化泥岩层上形成了黄土-泥岩接触带，地下水发育时该接触带演化为黄土-泥岩接触面滑坡的滑带土。此种混合型滑带土饱水后由于风

表 1 研究区滑带土的基本物理性质  
Table 1 Physical properties of soils from the slip zones

| 样名  | 含水量/% | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 比重   | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 |
|-----|-------|--------------------------|------|------|------|------|
| HNC | 29.77 | 1.95                     | 2.70 | 29.0 | 17.8 | 11.2 |
| BSC | 29.27 | 1.99                     | 2.72 | 34.4 | 22.8 | 11.6 |
| ZTC | 30.77 | 2.00                     | 2.72 | 30.7 | 18.1 | 12.6 |

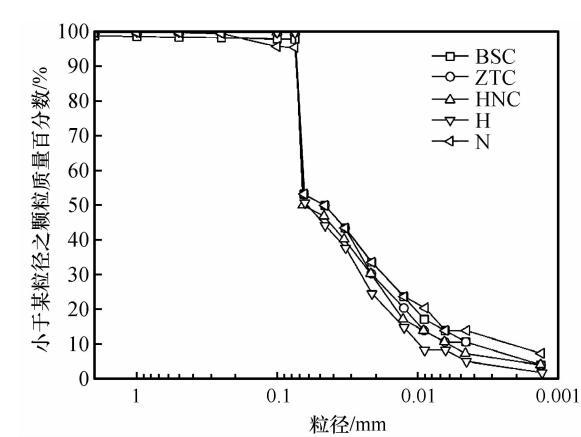


图 5 滑带土与黄土颗粒分布

Fig. 5 The partial size distribution curves of slip zone soil and loess from Huanancun landslide (HNC), Banshancun landslide (BSC), Zuitoucun (ZTC), loess (H) and mudstone (N) loess

化泥岩形成的特殊结构具有较好的储水性，水在剪切带流动过程中不断软化滑带土，导致其强度急剧降低。

根据土工规范(GB/T 50123 - 1999)对滑带土进行含水量、密度、界限含水量、颗粒分布以及比重测试，基本物理性质指标见表 1，颗粒分布曲线见图 5(H 表示黄土，N 表示泥岩)。测试过程中对于含水量以及密度等基本物理指标的测试均设置了平行试样，平行样之间的误差控制在规范要求范围内，保证试验结果的可靠性。

2.2 试验方法

本文利用 GDS 非饱和三轴仪研究黄土-泥岩接触面滑坡滑带土的力学特征。GDS 非饱和三轴仪由围压控制器、反压控制器、轴压控制器以及数据采集板和围压室以及计算机等组成，可自动采集数据。

由于黄土-泥岩接触面滑坡滑带土为强强化泥岩和黄土的混合物，孔隙较小，结构较为致密，剪切过程中受到下伏泥岩阻碍而排水效果较差，且滑坡反复滑动过程中，滑带土一直处于不断挤压、揉搓状态中，结构性已被破坏。此外，滑坡前缘探坑

取样过程中发现，滑带位置地下水极为发育，探坑底部开始积水导致滑带土无法成形。故研究中采用滑带土重塑样进行固结不排水三轴压缩试验，基于试验结果对滑带土的力学性质进行探讨。滑带土重塑样的密度和含水量与现场测试样一致。

利用扫描电子显微镜对滑带土微观结构性质的研究，试样冷干、喷粉后开始试验，放大倍数为 100 倍、400 倍、600 倍和 1 000 倍。最后根据试验效果选择 400 倍、600 倍和 1 000 倍的结果进行重点分析。

3 试验结果

3.1 滑带土三轴试验结果

利用 GDS 非饱和三轴仪对三处滑带土重塑样进行固结不排水试验。试验结果见图 6 ~ 8，由于试样已经接近饱和状态，只需对试样进行反压饱和，就能保证试样达到规范要求的饱和度：B 值达到 0.95 以上。饱和之后，对花南村试样在有效固结压力为 150 kPa、200 kPa 和 300 kPa 条件下分别进行固结，半山村试样和咀头村试样在 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 条件下分别进行固结。固结结束后分别对试样进行不排水剪切，剪切速率为 0.05 mm·min<sup>-1</sup>。

由图 6 知，随着固结应力的增加，三处黄土-泥岩接触面滑坡的滑带土的正应力都出现了增加的现象，且应力应变关系均表现出明显的应变硬化特征。花南村滑坡和咀头村滑坡滑带土在固结应力为 300 kPa 时，应变硬化过程趋于稳定，而半山村滑坡滑带土在固结应力为 300 kPa 时，应变硬化在后续阶段出现了加速硬化的典型特征，这与半山村滑坡的塑性指数偏高密切相关。

由图 7 知，随着固结应力的增加，三处黄土-泥岩接触面滑坡的滑带土孔隙水压力增加，且出现了明显的峰值现象。峰值过后，孔隙水压力随应变的增加开始出现逐渐稳定的趋势，孔隙水压力的峰值与应力应变关系的峰值是对应的，即孔隙水压力升

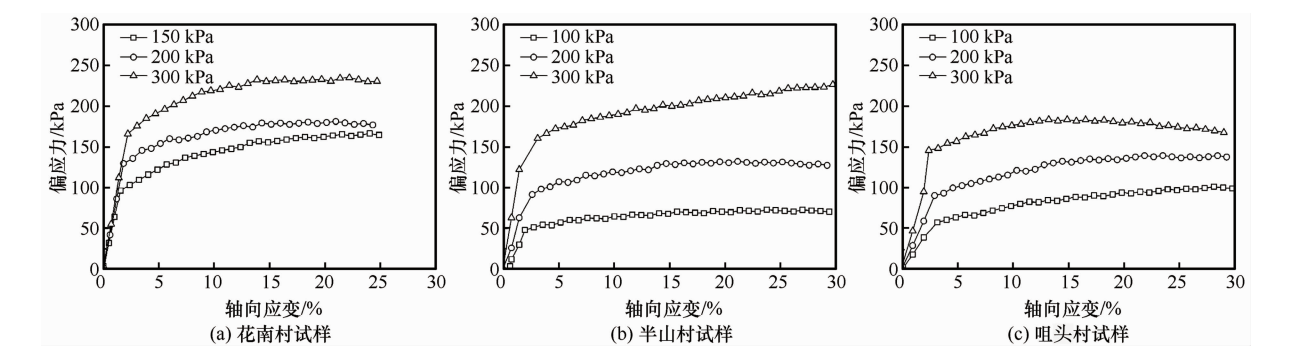


图 6 各试样黄土-泥岩接触面滑坡滑带土应力应变关系

Fig. 6 The soil stress-strain relationships of slip zone between loess and mudstone of Huanancun landslide ( a ) , Banshancun landslide ( b ) and Zuitoucun ( c ) landslide specimens

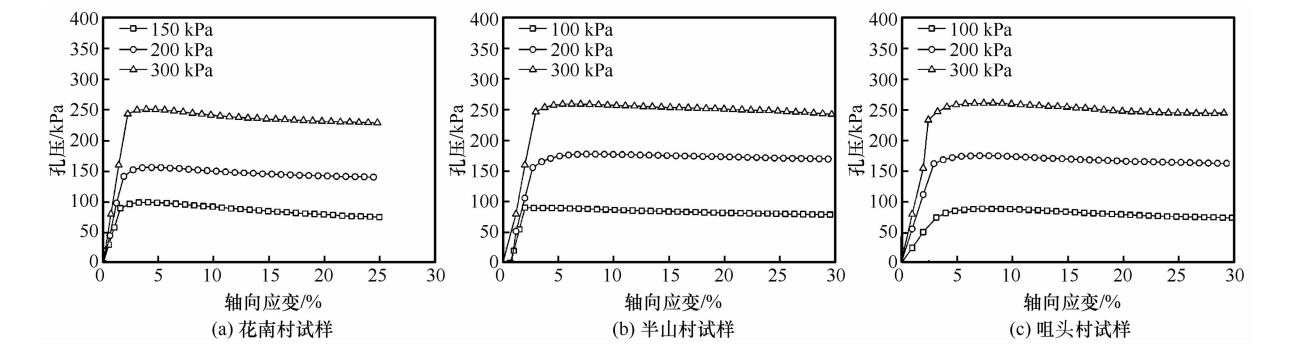


图 7 各试样黄土-泥岩接触面滑坡滑带土孔隙水压力与轴向应变关系

Fig. 7 The relationship between pore water pressure and axial strain of slip zone soil of loess-mudstone interface of Huanancun landslide ( a ) , Banshancun landslide ( b ) and Zuitoucun ( c ) landslide specimens

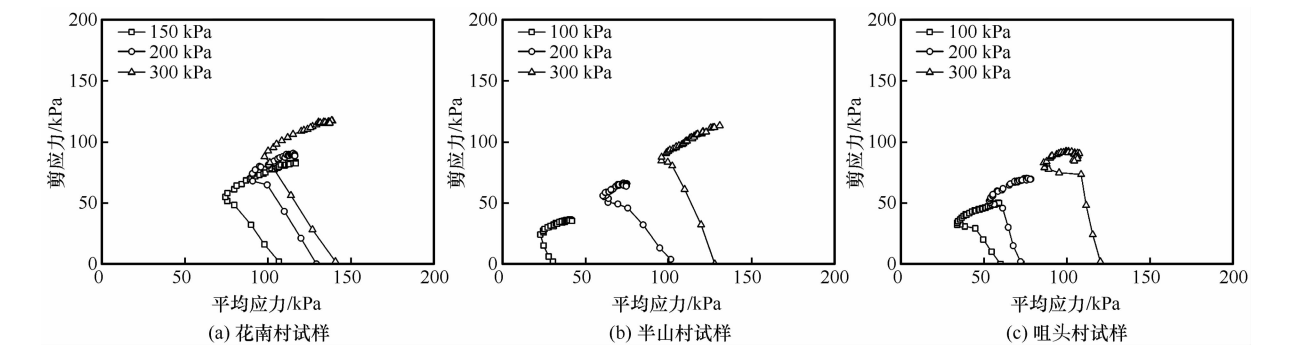


图 8 各试样黄土-泥岩接触面滑坡滑带土应力路径曲线

Fig. 8 The stress paths of slip zone soil of loess-mudstone interface of Huanancun landslide ( a ) , Banshancun landslide ( b ) and Zuitoucun ( c ) landslide specimens

高到一定值后，试样开始破坏，与应力应变关系中的峰值偏应力相对应。

图 8 为黄土-泥岩接触面滑坡滑带土在剪切过程中的有效应力轨迹曲线，即应力圆顶点的轨迹。三种试样均出现了明显的应变硬化现象。由于试样取自滑坡滑动后的剪出口位置，故滑带土处于残余状态。残余状态的滑带土经历了前期滑动中的反复挤压作用，导致其处于超固结状态，这也是引起滑带土应变硬化的重要原因之一。有效应力路径曲线

的转折点处，也是孔隙水压力的峰值点位置，前期应力圆顶点逐步增加，增加过程中速率由大变小，后期增加到相对稳定值后又开始出现增大现象。该现象与应力应变关系曲线中试样变形顺序相对应：开始时试样的变形以弹性变形为主，后来由弹性变形转变为塑性变形，最后试样在不断增加的垂向应力下屈服。

### 3.2 滑带土微观试验结果

采用扫描电子显微镜对天水三处黄土-泥岩接

触面滑坡滑带土的微观结构进行研究。扫描电镜试验之前首先对试样进行冷冻干燥,冷干处理后方可进行试验。试验放大倍数选取 100 倍、400 倍、600 倍和 1 000 倍。文章中为便于对比分析,仅列出了放大倍数为 400 倍、600 倍和 1 000 倍的试验结果。花南村滑坡滑带土(HNC)、半山村滑坡滑带土(BSC)以及咀头村滑坡滑带土(ZTC)试验结果如图 9~11。图中照片为滑带土试样经过冷干处理之后直接拍摄的电镜照片。试验中相同放大倍数下的试样设置平行样,但为了便于比较,仅列出每组平行试样中的一个具有代表性的结果进行对比分析。

电压以及样品表面喷涂金粉对扫描电镜试验结果均会产生影响。因此将该试验在委托样品分析中心测试。样品分析中心工作人员工作经验丰富,对于喷粉的均匀程度以及拍摄时电压的设置等操作均

较为娴熟,保证了试验结果的可靠性。

由图 9~11 知,低放大倍数下,黄土-泥岩接触面滑坡滑带土颗粒大,随着放大倍数的增加,大颗粒周围的小颗粒开始出现,且小颗粒紧密地附着在大颗粒上面,包裹着大颗粒。大颗粒粒径在 0.01~0.08 mm 之间,小颗粒粒径在 0.002~0.008 mm 之间。大颗粒之间的空隙被小颗粒填充,众多细小颗粒紧密地黏结在一起。滑带土中的大颗粒以较大的粉土颗粒和较小的砂土颗粒组成,细颗粒以较小的粉土颗粒和部分黏粒组成。

花南村滑坡滑带土、半山村和咀头村滑坡滑带土的微观结构相比,花南村试样大颗粒较少,半山村和咀头村试样细颗粒多且联接更加紧密。滑带土中的大颗粒和小颗粒形状极不规则,尤其是小颗粒,有圆形、亚圆形以及次棱角形等,大颗粒则以

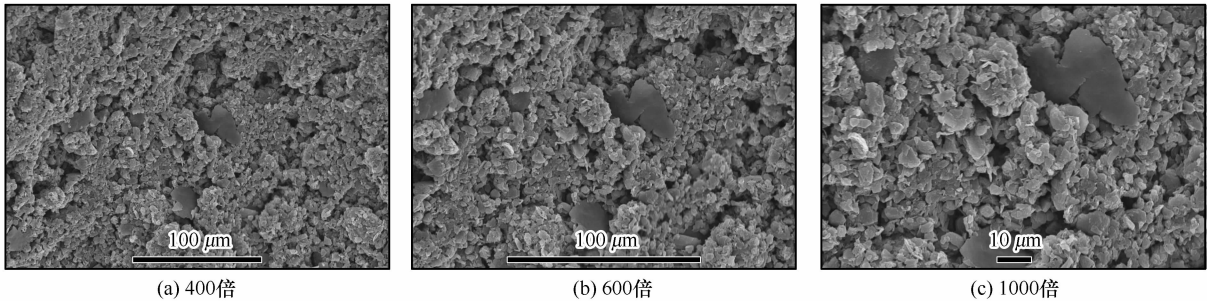


图 9 花南村滑坡滑带土电镜照片  
Fig. 9 The SEM photos of slip zone soil of Huanancun landslide

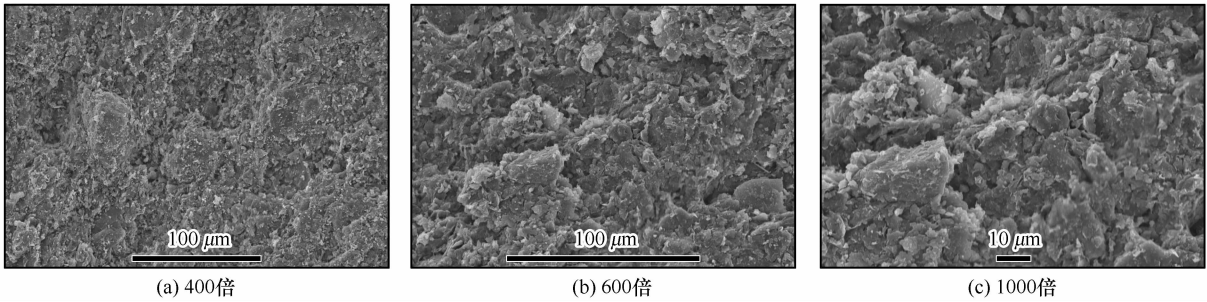


图 10 半山村滑坡滑带土电镜照片  
Fig. 10 The SEM photos of slip zone soil of Banshancun landslide

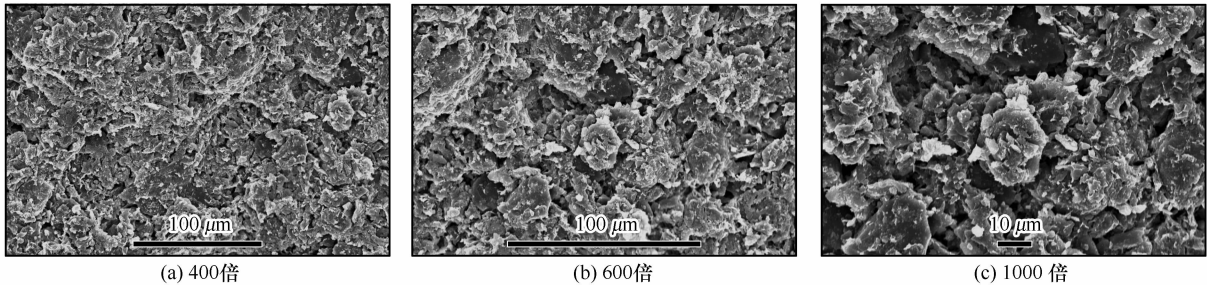


图 11 咀头村滑坡滑带土电镜照片  
Fig. 11 The SEM photos of the slip zone soil of Zuitoucun landslide



亚圆形和次棱角形为主。

在 1 000 倍放大倍数下,滑带土颗粒具有一定的定向性。这表明滑带土在剪切过程中,颗粒产生了较为明显的定向滑移。黄土-泥岩接触面滑坡中的新滑坡滑带土的颗粒处于持续活动状态,未形成圆形团粒等较大的颗粒,但其中以片状大颗粒为主,具有定向性;而黄土-泥岩接触面滑坡中的复合型滑坡和老滑坡滑带土,由于滑坡滑动中经历了间歇性的稳定阶段,滑带土中较大的团粒和聚粒形成的定向性更为明显。

## 4 分析与讨论

从滑带土的微观结构中可以发现,不均匀的滑带土中存在由大量黏土颗粒包裹的大颗粒,这些大颗粒包括滑带中的粉粒和少量的砂粒。这些较硬的大颗粒被黏土颗粒包裹后,其活动会受到黏土颗粒的限制。轴向荷载开始施加时,较硬的骨架开始承受主要的应力,试样表现出弹性变形行为,与图 6 中应力应变关系起始阶段出现的弹性变形对应。当轴向荷载进一步增大时,颗粒骨架之间的接触力超出了自身剪应力,开始产生颗粒间滑动,出现了一定的塑性变形。随着接触颗粒间滑动的进一步增大,颗粒骨架受到软弱黏土质的限制,此时,软弱的黏土质开始承受压力,滑带土中大颗粒之间接触达到一种新的平衡状态。试样受到的应力继续增大,颗粒骨架重新分配组合。随着大量的黏土质限制颗粒骨架的接触,骨架的接触力开始增加,最终导致了应变硬化现象的产生。应变随着应力的增加也一直在增加,应变在经历一个大变形之后,所有的黏土质进入完全塑性状态,再不能限制颗粒骨架的接触。随后,滑带土试样达到理想塑性状态,表现出随着应力的增加应变保持恒定,与图 6 中应力应变关系中峰值后的力学特性相对应。

从图 5 的滑带土颗粒分布曲线可知,滑带中细颗粒含量居多,粒径在 0.075 mm 以下的颗粒占到滑带土总量的 50% 以上,而粒径小于 0.005 mm 的黏土颗粒含量可达 30%。滑带土中大量的细颗粒富集,导致滑带土中的孔隙以小孔隙居多,仅有少量的中孔隙。滑坡滑动过程中,滑带土受到反复挤压后中孔隙大多变成小孔隙,且众多小孔隙在滑带土反复挤压中联通性变差。尽管滑带土在地下水的长期浸泡作用下处于饱水状态,但由于孔隙小且联通性较差,孔隙水压力在滑坡滑动中无法及时消散,加之滑带中黏土富集,黏土颗粒表面的结合水

对于孔隙也有一定的阻塞作用,导致滑带土中孔隙水压力在剪切过程中一直升高,后期稳定在一个较高值并随着应变的增加保持恒定。前期升高系由滑带中的中孔隙变成小孔隙,同时黏土颗粒表面结合水堵塞部分孔隙,从而降低孔隙联通性造成;后期孔隙水压力保持在一个相对稳定值系由滑带中的孔隙变化相对较小,只是孔隙水压力在剪切面上的局部转移,宏观上表现出恒定的孔隙水压力。孔隙水压力在剪切面上的局部变化引起滑带土剪切面上应变的局部变化,整体上表现出等速变形的特征。

## 5 结论

通过三轴试验和扫描电镜试验对黄土-泥岩接触面滑坡滑带土的力学特征进行了研究,基于滑带土基本物理力学性质,结合微观结构特征对滑带土力学变化特征进行分析,结论如下:

(1) 黄土-泥岩接触面滑坡滑带土在三轴固结不排水剪切过程中,应力应变关系呈现出应变硬化的典型特征,孔隙水压力在滑带土剪切破坏之后保持稳定状态。应力路径曲线表明应力圆顶点处的极值呈现出先缓慢增加后快速增加的特征。此外,滑带土长期在地下水浸泡作用下,由于排水效果差,前期剪切过程中表现出孔隙水压力一直增加,直至出现峰值;后期,滑带中溶解出的黏土矿物颗粒表面结合水阻塞了滑带土孔隙后,引起超孔隙水压力无法消散,使得孔隙水压力保持相对稳定状态。

(2) 产生应变硬化现象的内在机制是:黄土-泥岩接触面滑坡滑带土中大量黏土颗粒包裹大颗粒,剪切中大颗粒错动,变形增大之后黏土质阻碍大颗粒进一步运移。

(3) 黄土-泥岩接触面滑坡滑带土的力学特性表明其具有应变硬化的典型特征,该特征是此类滑坡长期处于缓动低速滑动的重要原因。

本研究结果对于认识此类滑坡的运动特征具有重要意义,同时可在此基础上为此类滑坡的治理工作提供指导。

致谢:本文内容来源于刘伟硕士毕业论文《黄土-泥岩接触面滑坡滑带土变形特征研究》,对论文试验中提供帮助的老师和同学表示衷心的感谢。

## 参考文献 (References):

- [1] Han Aiguo, Nie Dexin, Ren Guangming, et al. Study on shear rheologic behaviors of soil in slip zone of a large-scale landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 345-348.
- [韩爱果, 聂德新, 任光明, 等. 大型滑坡滑带土剪切流变特

- 性研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 345–348.]
- [2] Jiang Xiuzi, Wen Baoping. Creep behavior of slip zone of reactivated slow-moving landslide and its characteristic strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 495–501. [蒋秀姿, 文宝萍. 缓慢复活型滑坡滑带土的蠕变性质与特征强度试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 495–501.]
- [3] Huang Bin, Fu Xudong, Tan Fan, et al. Experimental study of relationship between water content and strength or deformation of slip soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2613–2618. [黄斌, 傅旭东, 谭凡, 等. 含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2613–2618.]
- [4] Tian Bin, Dai Huichao, Wang Shimei. Strength characteristics of soil in slide zone and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2887–2892. [田斌, 戴会超, 王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2887–2892.]
- [5] Chen Xiaoping, Huang Jingwu, Yin Saihua, et al. Experimental study of strength property of slip zone soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3212–3218. [陈晓平, 黄井武, 尹赛华, 等. 滑带土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3212–3218.]
- [6] Carey J M, Petley D N. Progressive shear-surface development in cohesive materials implications for landslide behaviour[J]. Engineering Geology, 2014, 177(14): 54–65.
- [7] Bishop A W, Green G E, Garga V K, et al. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength[J]. Géotechnique, 1971, 21(4): 273–328.
- [8] Townsend F C, Gilbert P A. Tests to measure residual strength of some clay shales[J]. Géotechnique, 1973, 23(2): 267–271.
- [9] Anson R W W, Hawkins A B. Analysis of a sample containing a shear surface from a recent landslip, south Cotswolds [J]. Géotechnique, 1999, 49(1): 33–41.
- [10] Skempton A W. Residual strength of clays in landslides folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985, 35(1): 3–18.
- [11] Vithana S B, Nakamura S, Kimura S, et al. Effects of overconsolidation ratios on the shear strength of remolded slip surface soils in ring shear[J]. Engineering Geology, 2012, 131–132(13): 29–36.
- [12] Skempton A W. First-time slides in over-consolidated clays[J]. Géotechnique, 1970, 20(3): 320–324.
- [13] Zhang Luming, Zheng Mingxin, He Min. Study of characteristics of matric suction in landslide slip soils before and after landslide control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3305–3312. [张卢明, 郑明新, 何敏. 滑坡防治前后滑带土基质吸力特征研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3305–3312.]
- [14] Long Jianhui, Li Tonglu, Lei Xiaofeng, et al. Study on physical properties of soil in sliding zone of loess landslip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 289–293. [龙建辉, 李同录, 雷晓锋, 等. 黄土滑坡滑带土的物理特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 289–293.]
- [15] Chen Wenwu, Liu Wei, Lin Gaochao, et al. The study on sensitivity of landslide induced by changes in loess structure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 929–936. [谌文武, 刘伟, 林高潮, 等. 天水黄土结构性变化诱发滑坡敏感性分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 929–936.]
- [16] Wu Weijiang, Ye Weiling, Yao Zhengxue, et al. Characteristics of the Luojiapo loess landslides at Heifangtai, burst on April 29, 2015, in Yongjing County, Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 662–670. [吴玮江, 叶伟林, 姚正学, 等. 甘肃永靖黑方台4·29罗家坡黄土滑坡的特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 662–670.]
- [17] Gibo S, Egashira K, Ohtsubo M. Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 24(3): 456–461.
- [18] Liu Dong, Chen Xiaoping. Microscopic observation and analysis of ring shear surface of slip zone soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1827–1834. [刘动, 陈晓平. 滑带土环剪剪切面的微观观测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1827–1834.]
- [19] Hicher P Y, Wahyudi H, Tessied D. Microstructure analysis of strain localization in clay [J]. Computers and Geotechnics, 1994, 16(3): 205–222.
- [20] Jiang Mingjing, Peng Licai, Zhu Hehua, et al. Microscopic investigation on shear band of marine clay in Zhuhai, China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2017–2023. [蒋明镜, 彭立才, 朱合华, 等. 珠海海积软土剪切带微观结构试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2017–2023.]
- [21] Chen Song, Xu Guangli, Chen Guojin, et al. Research on engineering geology characteristics of soil in sliding zone of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3048–3052. [陈松, 徐光黎, 陈国金, 等. 三峡库区黄土坡滑坡滑带工程地质特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3048–3052.]
- [22] Wang Hongxing, Tang Huiming, Chen Cong. Study on X-ray diffraction for the orientability of clay minerals in sliding-soil [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004 (Suppl. 1): 79–81. [王洪兴, 唐辉明, 陈聪. 滑带土黏土矿物定向性的X射线衍射及其对滑坡的作用[J]. 水文地质工程地质, 2004(增刊1): 79–81.]
- [23] Song Binghui, Chen Wenwu, Wu Weijiang, et al. Microstructure fractal of sliding zone soil of Suoertou landslide in Zhouqu [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Suppl. 1): 292–296. [宋炳辉, 谌文武, 吴玮江, 等. 舟曲锁儿头滑坡滑带土微结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 292–296.]
- [24] Li Jiang, Xu Qiang, Hu Zeming, et al. Experiment research on softening of undisturbed saturated slip soil in eastern of Sichuan Province red bed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl. 2): 4333–4342. [李江, 许强, 胡泽铭, 等. 川东红层原状滑带土饱水软化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4333–4342.]
- [25] Chen Jian, Dai Fuchu, Xu Ling, et al. Properties and microstructure of a natural slip zone in loose deposits of red beds, southwestern China[J]. Engineering Geology, 2014, 183: 53–64.
- [26] Wu Weijiang, Wang Nianqin. Basic types and active features of loess landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(2): 36–40. [吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 36–40.]



# Study of the mechanical characteristics of slip zone soils sampled from loess-mudstone interface

CHEN Wenwu<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, LIN Gaochao<sup>1,2</sup>, SUN Guanping<sup>1,2</sup>, WU Weijiang<sup>3</sup>

( 1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China )

**Abstract:** Slip zone soil, an important part of landslide, is a layer of soil which has weak structure, of which the physical and mechanical properties and the microstructure are closely related to the development of landslide and the followed motion features. The loess-mudstone interface landslide is classified according to the geological origin, of which the upper part is loess while the underlying one is mudstone. This kind of landslide is difficult to be noticed in early stage due to the features of gentle movement with low velocity. So when it caught the attention, it had resulted in serious harm. In this thesis, the GDS triaxial apparatus was used to research the mechanical properties of the slip zone soils which were sampled from Huanancun landslide, Banshancun landslide and Zuitoucun Landslide. The change characteristics of the mechanical properties were analyzed in combination with microstructure features. The research results show that there are larger particles wrapped by clay in the slip zone. These larger particles suffer dislocation and slippage during the deformation of slip zone soil. Meanwhile, they would be restricted by the ambient clay. As a result, in the slip zone soil shows typical macroscopic characteristics of strain hardening. Besides, another important feature of this kind landslide is that the pore water pressure cannot dissipate timely. Strain hardening makes the slip zone soil remain in continuous movement without significant residual strength, and the energy is releasing gradually. These reasons makes this kind of landslide moves gently with low velocity.

**Key words:** slip zone soil; loess-mudstone interface landslide; mechanical characteristics; triaxial test; strain hardening

( 本文编辑：庞瑜 )