

黄土基岩接触面滑坡滑带土物理力学特性及微观结构

王 雷^{1,2}, 赵法锁¹, 程晓辉¹, 齐 笛¹, 王 瑞³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁西安勘察设计院有限责任公司, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 滑带土抗剪强度取值及微观结构特性对于边坡稳定及防治具有重要意义。以陕西延安地区二庄科滑坡为研究对象, 通过剪切试验、扫描电镜及 X 射线衍射仪等, 对典型黄土基岩接触面滑坡滑带土物理力学特性及微观结构进行研究; 通过剪切试验得到不同含水率、不同干密度条件下滑带土的抗剪强度参数及其与含水率、干密度之间的相关性函数; 通过研究其微观结构及矿物成分, 分析了不同干密度、不同垂直压力条件下的土样微观结构。结果表明: 随着含水率的减小和干密度的增加, 土样的抗剪强度参数均有所提高; 黏聚力与含水率呈负指数关系, 内摩擦角与含水率呈负线性关系, 黏聚力、内摩擦角分别与干密度呈正线性关系; 随着垂直压力的增大, 孔隙离散指数增大, 颗粒离散指数、孔隙(颗粒)平均形态系数、孔隙(颗粒)定向概率熵及孔隙(颗粒)定向分维数均减小; 随着干密度的增大, 颗粒定向概率熵及颗粒定向分维数均增大。

关键词: 黄土; 滑坡; 滑带土; 重塑土; 剪切试验; X 射线衍射; 物理力学; 微观结构

中图分类号: P642.1

文献标志码: A

Physical and Mechanical Properties and Microstructures of Slip Soil of Loess Bedrock Contact Landslide

WANG Lei^{1,2}, ZHAO Fa-suo¹, CHENG Xiao-hui¹, QI Di¹, WANG Rui³

(1. School of Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Xi'an Railway Survey and Design Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Shear strength and microstructure characteristics of slip soil are important for the slope stability. Taking Erzhuangke landslide in Yan'an area of Shaanxi as an example, the physical and mechanical properties and microstructures of slip soil of loess bedrock contact landslide were discussed based on the shear test, scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer. The shear strength parameters of slip soil under the condition of different moistures and dry densities were obtained through the shear test, and the correlation between the shear strength parameters, moisture and dry density were discussed. According to the mineral composition, the microstructure characteristics of slip soil under the condition of different dry densities and vertical pressures were analyzed. The results show that the shear strength parameters of soil samples

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202190); 陕西省自然科学基金项目(2016JM4019);
中央高校基本科研业务费专项资金项目(310828163409)

作者简介: 王 雷(1981-), 男, 安徽寿县人, 中铁西安勘察设计院有限责任公司高级工程师, 长安大学工学博士研究生,
E-mail: wl_construction@163.com。

通讯作者: 赵法锁(1954-), 男, 河南三门峡人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: zfasuo@163.com。

increase with the decrease of moisture and the increase of dry density; the relationships of cohesion, internal friction angle with moisture are negative exponent and negative linear, respectively; the relationships of cohesion, internal friction angle with dry density are positive linear; with the increase of vertical pressure, all of the dispersion indexes of particle, and the average shape coefficients, quantitative probabilistic entropy and orientation fractal dimension of porosity (particle) decrease; with the increase of dry density, both of quantitative probabilistic entropy and orientation fractal dimension of particle increase.

Key words: loess; landslide; slip soil; remolded soil; shearing test; X-ray diffraction; physical mechanics; microstructure

0 引言

滑坡是中国常见的地质灾害之一,一旦诱发,往往危害严重^[1]。滑带土是滑坡的重要组成部分,其变形破坏机理与滑坡的发展变形、稳定性评价等息息相关;在有些情况下,虽然其内摩擦角仅差 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$,但滑坡推力却会成倍增加^[2-3]。长期以来,前人针对具体的工程实际,从滑带土的物理力学性质、微观结构、粒度组成等方面对滑带土展开了较为详尽的研究,也取得了大量的研究成果^[4-6]。谢放等通过对滑坡滑带土进行室内剪切试验,获得其抗剪强度参数,并分析了不同含水率、不同粒径下滑带土剪切特性变化规律^[7];宋丙辉等利用室内大型直剪仪对不同含水率下锁儿头大型断层破碎带滑坡滑带土的剪切特性进行了试验研究^[8];郑苗苗等通过室内试验对关中西部大型黄土滑坡滑带土的粒度成分、结构、物理力学性质等进行了研究^[9];汤文等通过X射线衍射和压汞试验研究了四川屏山地区某一古滑坡滑带土的成分及其在不用水化学条件下的力学特性和渗透性变化规律^[10];李瑞娥等以甘肃天水地区椒树湾滑坡为例,从滑带土的分类、物理力学性质、宏观与微观特征等方面分析了黄土滑坡滑带土的特点^[11];周春梅等通过分析滑带土的微观结构和矿物组成,对不同含水率条件下的滑坡稳定性进行了研究,发现滑坡稳定性系数受土体含水率的影响显著,含水率为最优含水率时边坡最稳定^[12]。上述研究表明,滑带土的物理力学性质、微观结构和粒度组成对滑坡体稳定性的影响至关重要。

滑坡的形成机制较为复杂,不同地质条件和诱发因素下发生的滑坡往往其滑动机理也有所不同。中国西北地区发生的滑坡多为黄土滑坡,根据其滑面的发育位置和滑体的物质组成可以分为:黄土层内滑坡、基岩顺层滑坡、基岩切层滑坡和基岩接触面滑坡4种基本类型,其中尤以沿基岩面发生的滑坡

最为常见。黄土垂直节理发育,降水时雨水会顺着垂直裂隙直达基岩面并形成滞水层,雨水入渗导致与基岩接触面上黄土的物理力学性质发生改变,是基岩接触面滑坡发生的重要原因之一^[13]。已有研究中针对黄土基岩接触面滑坡滑带土的研究还较为缺乏。

本文以陕西延安地区二庄科滑坡为研究对象,分析了该滑坡滑带土的物理力学特性及微观结构特征,得到了不同干密度、不同含水率下的抗剪强度参数,讨论了参数之间的相关性;并借助激光粒度仪、X射线衍射仪、扫描电镜等观测手段及各种分析方法,研究了该滑坡滑带土的微观结构特征,为进一步分析区域滑坡的形成和变形机制提供依据,并为滑坡稳定性评估、工程设计提供参考。

1 滑坡概况及滑带土基本特性

1.1 地形地貌

陕西延安地区二庄科滑坡区地貌类型为黄土峁、黄土斜坡及黄土冲沟。斜坡上部陡,中下部缓,地形变化较大。该滑坡体位于黄土峁与黄土冲沟(二庄科沟)之间的斜坡地带,整体呈“簸箕”形,主滑方向约 54° ,整体坡度为 $13^{\circ}\sim 19^{\circ}$;滑坡体长270~310 m,宽约400 m,厚为1.5~29.3 m,平均厚度约15.7 m,体积约为 $132\times 10^4\text{ m}^3$,属大型黄土滑坡(图1)。坡体后缘为圈椅状的高陡后壁,清晰可见,高度为3~18 m,坡度为 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$;坡体前缘为二庄科沟底,以基岩面为界,滑面较缓。

1.2 地层岩性

二庄科滑坡滑床及附近地层主要为侏罗系及第四系,由老至新分别为:①中侏罗统延安组(J_2y),灰白、灰黄色薄层砂岩与泥岩互层,岩层倾向NW,倾角 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$;②第四系中更新统离石组(Q_2^{col}),浅黄、浅棕黄或浅棕红色粉质黏土、黏土夹数层棕红色古土壤;③第四系上更新统马兰组(Q_3^{col}),岩性以浅黄色

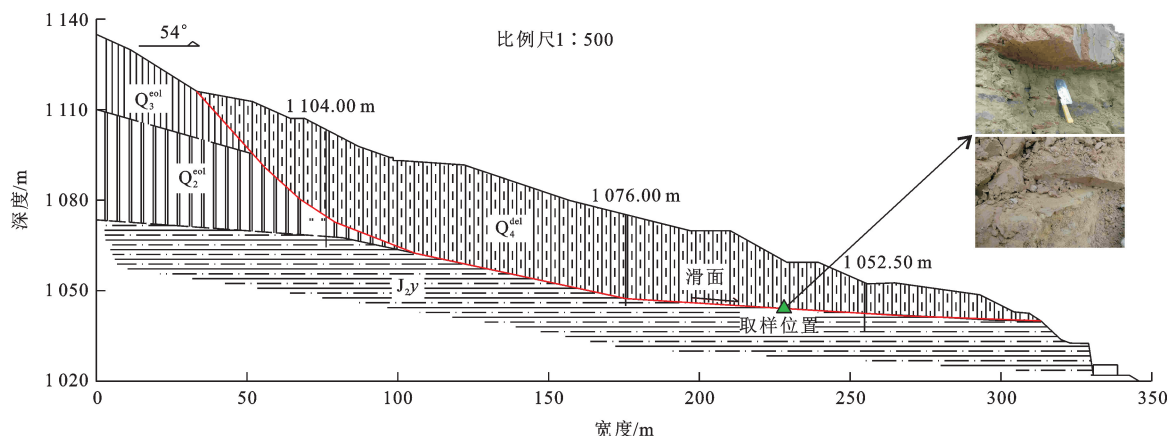


图1 陕西延安地区二庄科滑坡主滑断面

Fig. 1 Section View of Major Slide of Erzhuangke Landslide in Yan'an Area of Shaanxi

或淡黄色粉土及粉质黏土为主,结构疏松,质地均一,具湿陷性,中等压缩,厚度为1~10 m;④堆积土(Q_4^{del}),主要分布于区内滑坡地段,主要为滑坡体堆积物,结构松散,厚度随滑坡规模变化。

1.3 滑带土基本特征

鉴于滑带土的厚度较薄,难以取得滑带土的原状土,本文所取的滑带土样均为扰动样,滑坡体土样均为原状土样,取样点分布见图1。通过试验测得其原状土天然含水率(质量比)为18.70%~23.40%,干密度(ρ_d)为1.62~1.72 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,孔隙比为0.58~0.67,饱和度为86.00%~100.00%,液限为25.90%~30.40%,塑限为15.90%~17.90%。通过颗粒分析试验获得其粒径级配曲线(图2),粒径大于0.075 mm的颗粒含量(质量分数,下同)小于50%,且塑性指数介于10~17之间,滑坡体、滑带土均为粉质黏土。利用X射线衍射仪来探究土样的矿物成分,并采用Jade6.0软件对试验结果进行分析(图3)。参常见黏土矿物成分特征,可知二庄科滑坡滑带土主要含有石英、长石、绿泥石、方解石

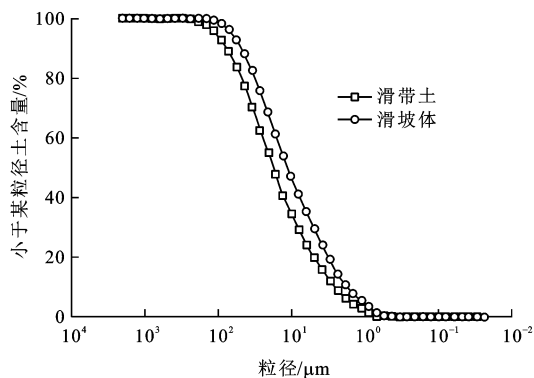


图2 滑坡体、滑带土粒径级配累积曲线

Fig. 2 Particle Size Grading Accumulation Curve of Slip Mass and Slip Soil

和白云母等矿物,滑带土的主要物质来源为黄土。

2 滑带土物理力学特性

2.1 滑带土的剪切特性

首先通过对滑带土的重塑样进行直剪试验来研究滑带土的剪切特性,试验仪器采用应变控制式直剪仪。在不同含水率(15%、17%、19%、21%)、不同干密度(1.55、1.65、1.75 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)及不同法向应力(100、200、300、400 kPa)下进行剪切,得到不同条件下的剪应力-剪切位移关系曲线。由于曲线变化规律无明显差别,限于篇幅,本文只列出干密度为1.55 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时的剪应力-剪切位移关系曲线(图4)。

通过对比分析不同条件下的剪应力-剪切位移关系曲线,发现滑带土的剪应力-剪切位移关系曲线大部分呈硬化型(少量为稳定型)特征,未出现应变软化的情况,说明其再生强度比较稳定^[14]。同一干密度条件下,不同法向应力下的抗剪强度随含水率的增加而降低。

在各级垂直压力下,找出滑带土破坏时的剪应力值,绘制不同含水率条件下应力(τ)-应变(σ)曲线,经线性拟合并结合库伦强度公式 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 即可求出黏聚力(c)、内摩擦角(φ)。各试样在不同干密度、不同含水率条件下的抗剪强度参数见表1。从表1可以看出:在同一干密度条件下,滑带土的抗剪强度参数(c 、 φ)随含水率的增大而减小;在同一含水率条件下,滑带土的抗剪强度参数随干密度的增大而增大。

2.2 滑带土抗剪强度参数与含水率、干密度的相关性分析

2.2.1 抗剪强度参数与含水率之间的关系

图5、6分别为不同干密度条件下的滑带土强度

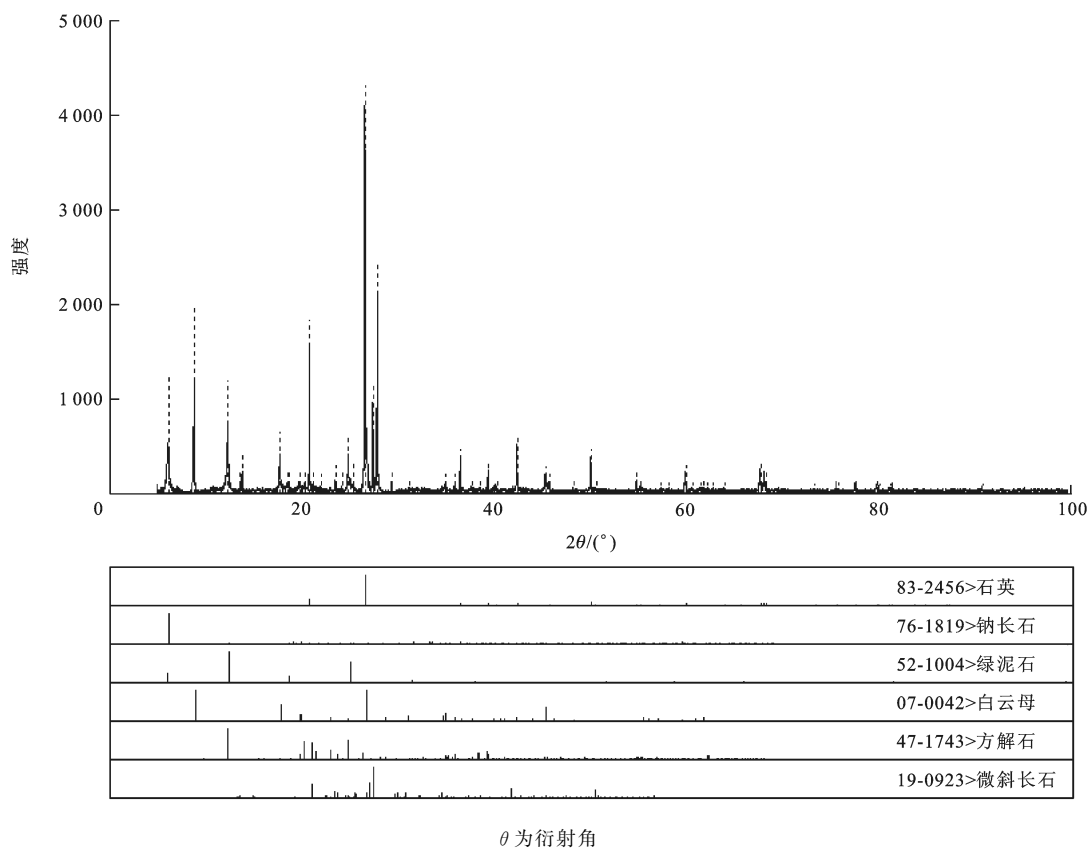


图3 滑带土 X 射线衍射谱

Fig. 3 X-ray Diffraction Spectrum of Slip Soil

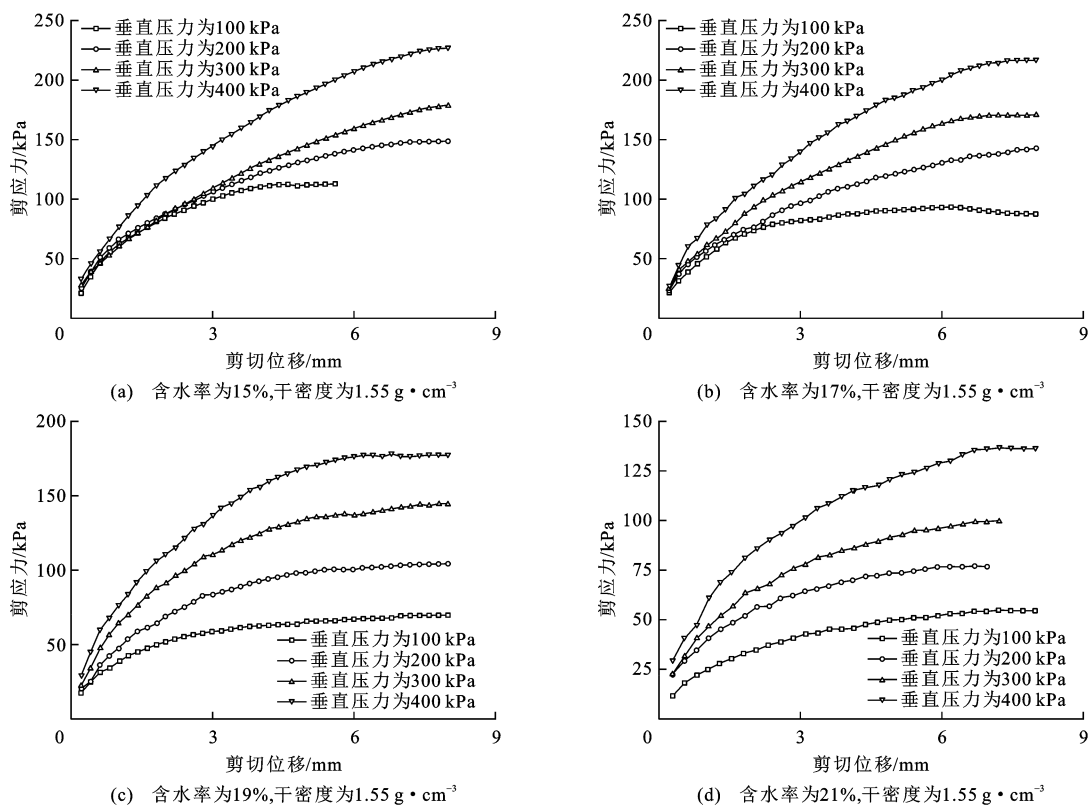


图4 不同条件下的剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Relationships Between Shear Stress and Shear Displacement Under Different Conditions

表 1 滑带土抗剪强度参数

Tab. 1 Shear Strength Parameters of Slip Soil

含水率/ %	不同干密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)条件下强度参数					
	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	1.55	1.65	1.75	1.55	1.65	1.75
15	44.22	53.32	63.90	20.52	23.81	26.76
17	40.60	47.15	54.15	18.27	20.99	23.78
19	33.80	36.50	40.43	16.84	19.45	21.39
21	26.10	28.15	31.00	14.54	15.55	17.03

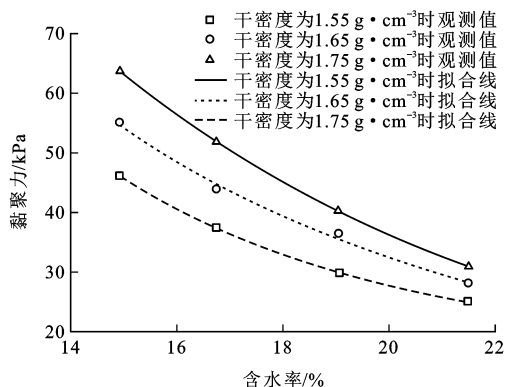


图 5 滑带土黏聚力与含水率的关系

Fig. 5 Relationships Between Cohesion and Moisture of Slip Soil

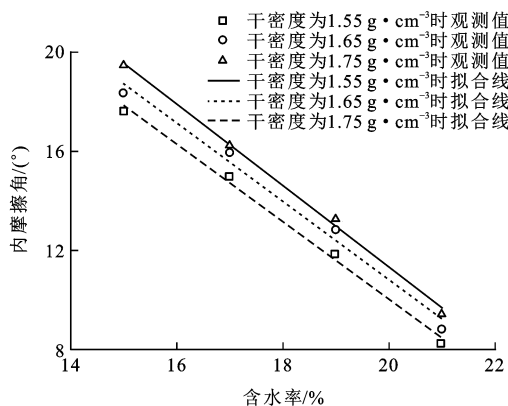


图 6 滑带土内摩擦角与含水率的关系

Fig. 6 Relationships Between Internal Friction Angle and Moisture of Slip Soil

参数随含水率变化的关系曲线。将黏聚力-含水率曲线变化规律近似地拟合为负指数关系;将内摩擦角-含水率变化规律拟合为线性关系;黏聚力、内摩擦角均随含水率的增大而减小。由图 5、6 可以看出,含水率对土样黏聚力和内摩擦角的影响不尽相同,随着含水率的增加,黏聚力减小的速率逐渐变缓,而内摩擦角减小的速率始终保持恒定。产生这种变化的原因可能有:①随着土体中含水率增加,土体孔隙中水分子增多,附着在土颗粒周围的结合水

向自由水转化,逐渐降低了土的抗剪强度;②水形成的吸附膜对固体颗粒产生了很强的润滑作用,大大降低了土体的内摩擦角;③当含水率增大时,扩大了土颗粒间的双电层,使粒间的斥力增大,易形成分散结构,土的黏聚力因此下降;④水溶解土中相关化学物质,降低颗粒间胶结作用力和范德华力,从而导致黏聚力的降低。

2.2.2 强度参数与干密度之间的关系

图 7、8 分别为不同含水率条件下滑带土强度参数随干密度变化的关系曲线。经线性拟合后可知,黏聚力、内摩擦角均随干密度的增大而增大,且线性相关性较好;由曲线斜率可以看出,黏聚力、内摩擦角随干密度的线性变化率均随含水率的增大而增大。产生这种变化的原因可能有:①干密度越大,土的孔隙比越小,土颗粒间接触越密实,距离减小,从而使分子间的静电力、范德华力、胶结力增大,在强度指标上表现为土体有较大的黏聚力;②随着干密度的增大,土颗粒之间交错排列,甚至产生颗粒破碎,使土变得更加密实,而颗粒破碎、重排列等均需要外力对其做功,进而提高了土的内摩擦角。

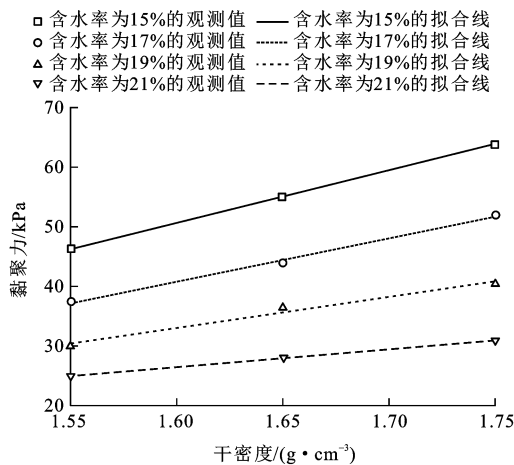


图 7 滑带土黏聚力与干密度的关系

Fig. 7 Relationships Between Cohesion and Dry Density of Slip Soil

3 滑带土微观结构

为了研究滑带土在不同干密度和不同垂直压力下的微观表现,采用 Quanta650 型环境扫描电镜(图 2)对土样微观结构进行观察。

3.1 试验步骤

(1)制备观察土样。将滑带土重塑制样,控制干密度分别为 1.55 、 1.65 、 $1.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;将土样于烘箱中烘干,并在观察前将样品用手轻轻掰开,

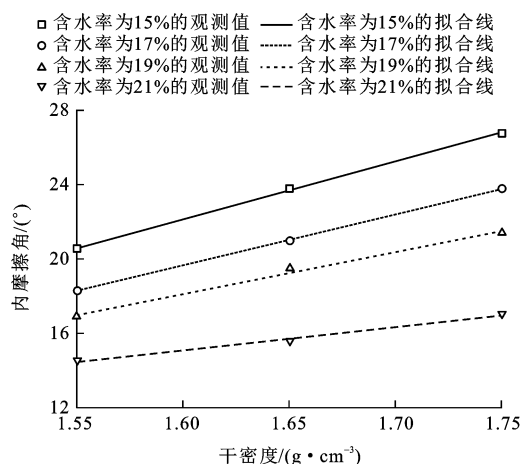


图8 滑带土内摩擦角与干密度的关系

Fig. 8 Relationships Between Internal Friction Angle and Dry Density of Slip Soil

得到新鲜的扫描断面;为节约时间(用扫描电镜观测土样时土样体积越大,抽真空所需要的时间就越长),用小刀从原样中削取长条形样品(长、宽都约10 mm,高3~5 mm),保留掰开的新鲜面;在样品表面镀金;将样品固定在真空仓底板上,并移入观察室。

(2)使用扫描电镜观察。通过对不同放大倍数下滑带土的微观结构图进行对比(图9),发现100倍和500倍图像中的微观颗粒及孔隙过小,不便于数据提取和分析,而3000倍、5000倍和10000倍

显示的范围较小,难以反映微观结构的整体布局,因此,本文选取放大倍数为1000倍的滑带土微观扫描电镜图像进行后续分析。

(3)应用IPP6.0软件对拍摄的扫描电镜图像进行分析。

3.2 微观结构参数的选取及定量分析

土的微观结构是一个非独立、多层次、多维度且非常复杂的系统,其研究范围包括颗粒形态、颗粒排列特征、孔隙形态、孔隙排列特征、颗粒接触关系等。本文在定量研究土体微观结构时取土颗粒和孔隙的大小、形态及排列分布等特征进行分析。

3.2.1 离散指数、平均形态系数

为了定量描述土颗粒和孔隙的形态,引入离散指数(e)和平均形态系数(F)^[7-8]。离散指数可以描述目标外形的复杂程度,表达式为 $e=s^2/A$ 。其中, s 为目标的实际周长, A 为目标的实际面积。目标的周长越大,离散指数越大,形状越复杂;离散指数越小,目标越趋于圆形。平均形态系数可以反映多个目标单元体形状的均值,表达式为 $F=(\sum_{i=1}^n F_i)/n$ 。其中, F_i 为第 i 个目标的形态系数, $F_i=P_i/S_i$, S_i 为第 i 个目标的实际周长, P_i 为一个和第 i 个目标等面积圆的周长。 F 值越接近1,目标越趋于圆形, F 值越接近0,目标形状越复杂。

孔隙(颗粒)的离散指数和平均形态系数随干密

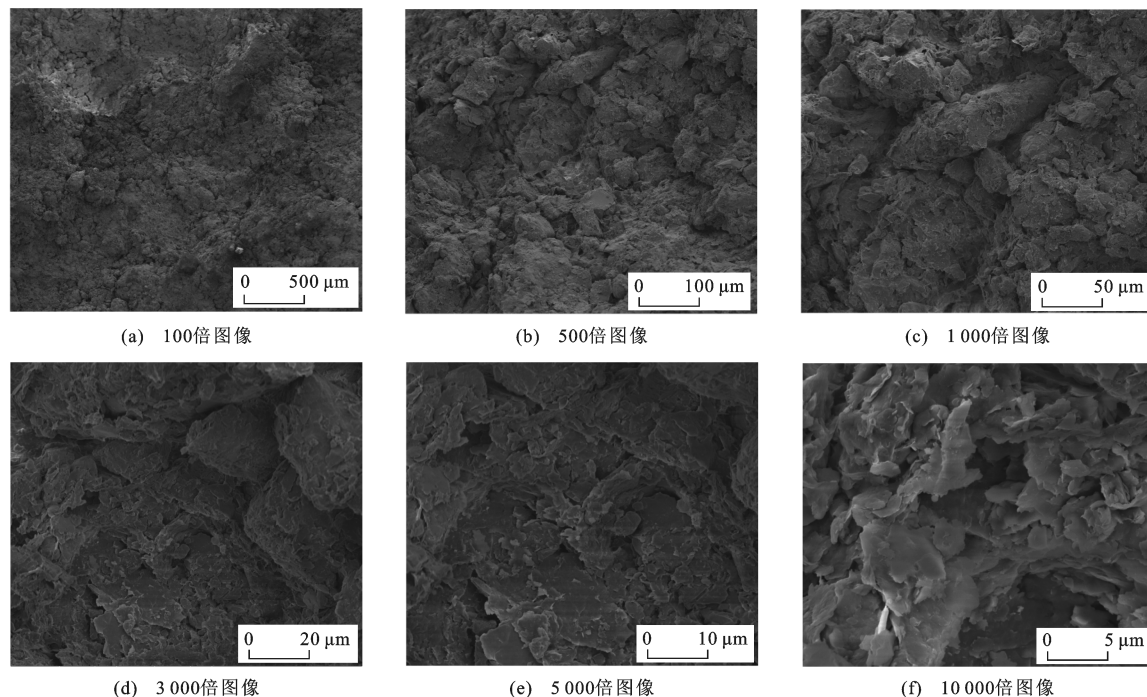


图9 不同放大倍数下的滑带土扫描电镜图像

Fig. 9 SEM Images of Slip Soil with Different Amplifications

度和垂直压力的变化规律见表 2。从表 2 可以看出:孔隙离散指数基本在 13.26~16.18 之间,颗粒离散指数基本在 16.28~17.32 之间;在同一干密度条件下,孔隙离散指数基本上随着垂直压力的增大而增大,而颗粒离散指数随着垂直压力的增大略有减小;在同一垂直压力条件下,随着干密度的增加,孔隙(颗粒)离散指数无明显变化规律。孔隙平均形态系数基本在 0.752~0.804 之间,颗粒平均形态系数基本在 0.945~0.975 之间;在同一干密度条件下,孔隙(颗粒)平均形态系数基本上随着垂直压力的增大而减小;在同一垂直压力下,孔隙(颗粒)平均形态系数随着干密度的增加均无明显变化。由此可见,垂直压力的作用可以适当改变孔隙和颗粒的形状和离散性,微观表现为颗粒的重新排列。随着垂直压力的增加,土体颗粒和孔隙的形状越复杂。

表 2 不同垂直压力条件下孔隙(颗粒)离散指数和平均形态系数

Tab. 2 Dispersion Indexes and Average Shape Coefficients of Porosity (Particle) Under Different Vertical Pressures

类型	垂直压力/ kPa	不同干密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 条件下离散指数			不同干密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 条件下平均形态系数		
		1.55	1.65	1.75	1.55	1.65	1.75
孔隙	100	15.023	14.921	13.261	0.800	0.804	0.773
	200	15.386	15.693	14.494	0.786	0.802	0.761
	300	15.875	15.355	15.196	0.784	0.793	0.754
	400	15.976	16.183	15.568	0.761	0.766	0.752
颗粒	100	16.948	17.315	16.842	0.971	0.963	0.970
	200	16.884	17.143	16.650	0.966	0.956	0.975
	300	16.979	16.908	16.283	0.945	0.960	0.965
	400	16.437	17.013	16.320	0.954	0.946	0.967

3.2.2 丰度

丰度(C)是指目标等效短轴与等效长轴的比值,表达式为 $C=B/L$ 。其中, B 和 L 分别表示目标的短轴和长轴长度。 C 值越接近 1,目标形状越趋于圆形; C 值越接近 0,目标形状越趋于长条形。

不同垂直压力、不同干密度条件下的孔隙(颗粒)丰度变化见图 10。从图 10 可以看出:孔隙(颗粒)的丰度变化基本呈正态分布,其中孔隙丰度在 0.3~0.5 之间的分布最为密集,这个区间的含量为 18.54%~22.76%;颗粒丰度在 0.3~0.6 之间的分布最为密集,这个区间的含量为 14.71%~20.17%。这说明滑带土的孔隙(颗粒)更趋向于次长条形,而长条形与圆形较少。

3.2.3 定向概率熵及定向分维数

当土颗粒及孔隙较多的表现为长条形时,其微观的排列特征对土体的物理力学性质影响较大。为了分析土颗粒和孔隙排列特征对土体力学性质的影响,引入概率熵(H_m)和分形维数(D_f)对其进行定量分析。定向概率熵用来描述结构单元体的有序性,表达式为 $H_m = - \sum_{i=1}^n F_i(\alpha) \log_n F_i(\alpha)$, H_m 值越接近 0,目标单元体越有序,反之则越混乱。分形维数是指 $\ln \alpha$ 与 $\sum_{i=1}^n F_i(\alpha) \log_n F_i(\alpha)$ 之间线性关系的斜率,表达式为 $D_f = (\sum_{i=1}^n F_i(\alpha) \log_n F_i(\alpha)) / \ln \alpha$ 。 D_f 值越高,其定向程度越差,反之则定向程度高。其中, $F_i(\alpha)$ 为在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内第 i 个 α 为中颗粒或孔隙的定向概率, α 表示在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内划分成 n 个等份区后,每个区位的角度,即 $\alpha = 180^\circ / n$ 。

表 3 为不同干密度、不同垂直压力条件下的重塑土样微观孔隙(颗粒)定向概率熵及定向分维数数量。从表 3 可以看出,在同一垂直压力条件下,随着干密度的增大,孔隙定向概率熵及定向分维数均无明显规律,而颗粒定向概率熵及定向分维数均增大,这表明颗粒的排列随着干密度的增加变得更加随机,在宏观上表现为抗剪强度的提高。由于垂直压力和土颗粒的排列特征均对土体的抗剪强度有影响,并且在同一干密度条件下,孔隙(颗粒)定向概率熵及定向分维数均随垂直压力的增大而减小,这说明孔隙(颗粒)的排列随着垂直压力的增大逐渐整齐有序,定向性逐渐变好。另外,相比于孔隙(颗粒)的排列特征,垂直压力的变化对土体抗剪强度的影响更为显著。

表 3 孔隙(颗粒)定向概率熵及定向分维数数量

Tab. 3 Quantity of Quantitative Probabilistic Entropy and Orientation Fractal Dimension of Porosity (Particle)

类型	垂直压力/ kPa	不同干密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 条件下定向概率熵			不同干密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 条件下定向分维数		
		1.55	1.65	1.75	1.55	1.65	1.75
孔隙	100	0.983	0.969	0.975	2.105	2.061	2.078
	200	0.973	0.958	0.971	2.073	2.044	2.048
	300	0.965	0.958	0.968	2.058	2.012	2.023
	400	0.962	0.944	0.954	2.011	1.954	1.976
颗粒	100	0.979	0.985	0.998	2.068	2.075	2.084
	200	0.969	0.977	0.986	2.056	2.061	2.072
	300	0.962	0.975	0.973	2.040	2.058	2.064
	400	0.952	0.961	0.972	2.035	2.049	2.052

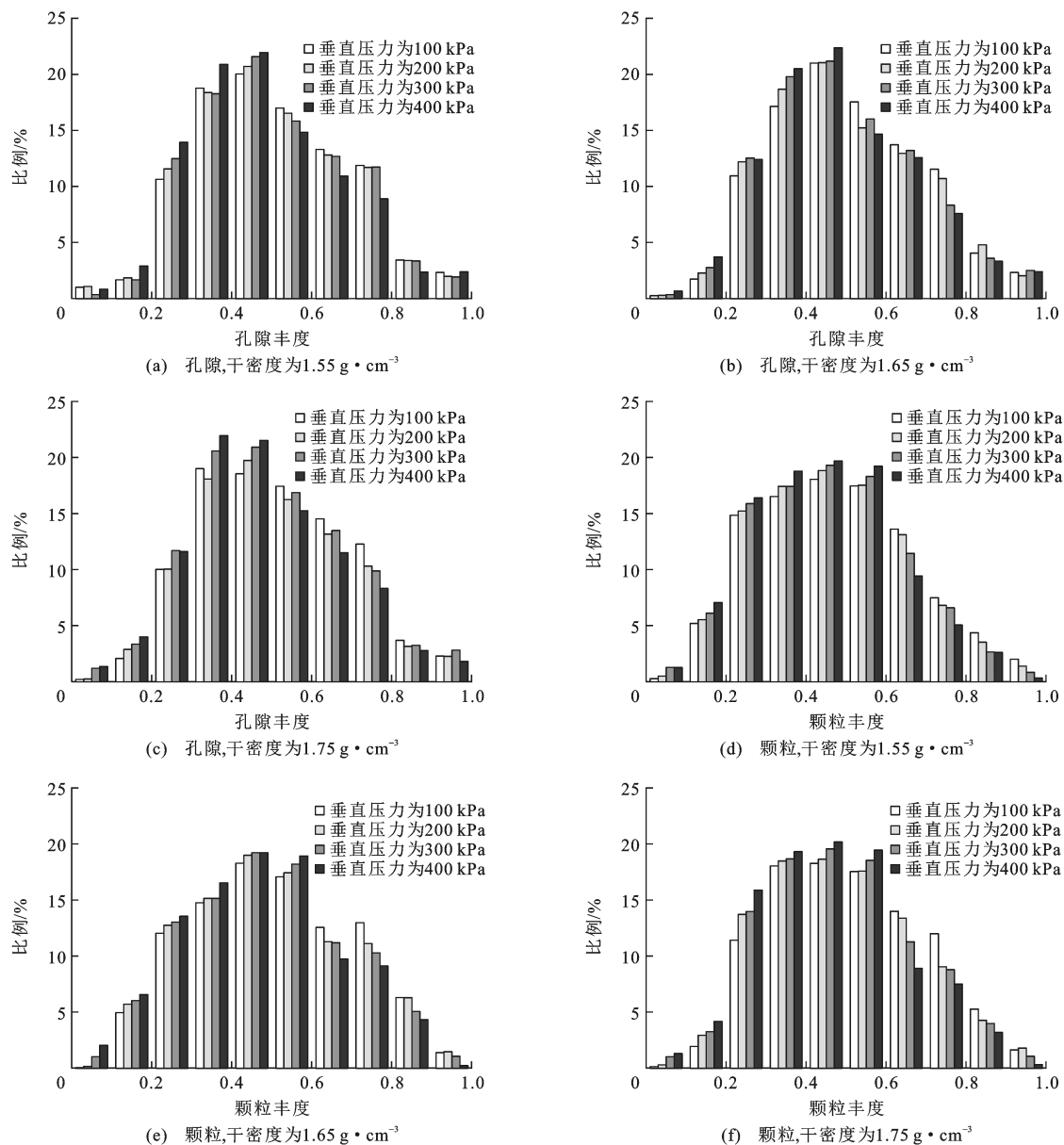


图10 孔隙和颗粒丰度变化直方图

Fig. 10 Histograms of Variation of Abundances of Pore and Particle

4 结 语

(1) 陕西延安地区二庄科滑坡滑带土在不同含水率(15%~21%)、不同干密度($1.55 \sim 1.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)条件下,黏聚力为 26.1~63.9 kPa,内摩擦角为 $14.54^\circ \sim 26.76^\circ$ 。在同一干密度条件下,随着含水率的增大,其抗剪强度参数逐渐减小;在同一含水率条件下,随着干密度的增大,其抗剪强度参数逐渐增大;抗剪强度参数与含水率、干密度均表现出良好的相关性,其中黏聚力与含水率呈负指数关系,内摩擦角与含水率呈负线性关系;黏聚力、内摩擦角分别与干密度呈正线性关系。

(2) 为进一步分析基岩接触面滑坡滑带土特性,结合微观结构试验,对滑带土各参数进行定性和定量分析,发现孔隙(颗粒)更趋向于次长条形。在同一干密度条件下,随着垂直压力的增大,孔隙离散指数增大,而颗粒离散指数、孔隙(颗粒)平均形态系数、孔隙(颗粒)定向概率熵及孔隙(颗粒)定向分维数均减小;在同一垂直压力条件下,随着干密度的增大,颗粒定向概率熵及颗粒定向分维数均增大,颗粒的排列更加随机,定向性逐渐变差。

参考文献:

References:

[1] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研

- 究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- ZHANG Mao-sheng, LI Tong-lu. Triggering Factors and Forming Mechanism of Loess Landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.
- [2] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- XU Bang-dong. Landslide Analysis and Prevention[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.
- [3] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 528-532.
- ZHENG Ming-xin. Research of Strength Characteristic of Landslide Slip and Revised Counter Calculation Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 528-532.
- [4] 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.
- LIU Xiao-li, DENG Jian-hui, LI Guang-tao. Shear Strength Properties of Slip Soils of Landslides: An Overview[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1849-1854.
- [5] 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.
- CHEN Song, XU Guang-li, CHEN Guo-jin, 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.
- [6] 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.
- CHEN Xiao-ping, HUANG Jing-wu, YIN Sai-hua, et al. Experimental Study of Strength Property of Slip Zone Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3212-3218.
- [7] 谢放, 胡桂林, 陶建明. 黄土坡滑坡滑带土室内直接剪切特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 32-35.
- XIE Fang, HU Gui-lin, TAO Jian-ming. The Shear Strength Parameters of Huangtupo Landslide Slip Zone Soils Based on the Direct Shearing Test[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 32-35.
- [8] 宋丙辉, 谌文武, 吴玮江, 等. 锁儿头滑坡滑带土不同含水率大剪试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 77-83.
- SONG Bing-hui, CHEN Wen-wu, WU Wei-jiang, et al. Experimental Study of Large Scale Direct Shear Test of Sliding Zone Soil of Suoertou Landslide with Different Moisture Contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 77-83.
- [9] 郑苗苗, 郑泓, 李同录. 关中西部大型黄土滑坡滑带土的物理力学特性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 343-348.
- ZHENG Miao-miao, ZHENG Hong, LI Tong-lu. Study on Physical-mechanical Properties of Sliding Soil of Large-scale Loess Landslides in Western Guanzhong[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 343-348.
- [10] 汤文, 姚志宾, 李邵军, 等. 水化学作用对滑坡滑带土的物理力学特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2885-2892.
- TANG Wen, YAO Zhi-bin, LI Shao-jun, et al. Effect of Pore Water Chemistry on Physical and Mechanical Properties of Sliding-zone Soil: An Experimental Study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2885-2892.
- [11] 李瑞娥, 徐郝明, 王娟娟. 黄土滑坡滑带土的特点: 以天水椒树湾滑坡为例[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1): 43-47.
- LI Rui-e, XU Hao-ming, WANG Juan-juan. Characters of Sliding Soil of the Loess Landslide: A Case Study from Jiaoshuwan, Tianshui[J]. Coal Geology and Exploration, 2009, 37(1): 43-47.
- [12] 周春梅, 赵子鹏, 鲁阳. 含水量对滑带土强度变形参数及滑坡稳定性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 213-219.
- ZHOU Chun-mei, ZHAO Zi-peng, LU Yang. The Influence of Water Content on Strength and Deformation Parameters of Sliding Zone and Slope Stability[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 213-219.
- [13] 折向毅. 黄土-基岩接触面滑坡形成机理[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- SHE Xiang-yi. The Formation Mechanism of Landslide of Loess and Bedrock Contact Surface[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [14] 马磊, 李满意, 魏燕珍, 等. 古滑坡滑带土强度特性及其影响因素研究[J]. 工程勘察, 2016, 44(2): 23-26.
- MA Lei, LI Man-yi, WEI Yan-zhen, et al. Study on Soil Strength Characteristics of Ancient Landslide Zone and Its Impact Factors[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2016, 44(2): 23-26.