

关中西部大型黄土滑坡滑带土的物理力学特性研究

郑苗苗^{1,2}, 郑泓¹, 李同录¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省地质环境监测总站, 西安 710054)

摘要:选取宝鸡市金台区为研究区域,通过对比分析三门组黏土与三趾马红土 2 类滑带土的成分、结构、物理及力学性质,揭示滑坡发生的物理力学特征。对两类滑带土取样,通过移液管全分散法分析两类黏土黏粒含量,并进行黏土矿物 X 射线衍射定量测试,经扫描电镜放大观察微观结构,用威廉姆斯膨胀判别法判别膨胀性,采用 105℃ 恒温烘干后的试样和天然含水量 2 种试样,放入注入清水的容器中进行崩解性试验,在天然和饱和 2 种状态下进行室内慢剪试验。结果表明,二者均属于中等—强膨胀性土,遇水易崩解;两类黏土峰值强度和残余强度差异大,粘聚力平均降低 2/3,含水量对其强度影响明显,饱和状态下,内聚力较天然状态降低 30%,内摩擦角降低 25%。说明滑坡发生时,黏土的峰残差值形成较大的下滑推力,导致滑体沿着滑床面瞬间高速滑动。

关键词:黄土滑坡; 滑带土; 物理特性; 内摩擦角; 粘聚力; 上新世黏土

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0343-06

Study on Physical-Mechanical Properties of Sliding Soil of Large-Scale Loess Landslides in Western Guanzhong

ZHENG Miaomiao^{1,2}, ZHENG Hong¹, LI Tonglu¹

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Shanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: We selected Jintai District of Baoji City as the study area to reveal the physical and mechanical characteristics of landslide by comparison and analysis of the composition, structure, physical and mechanical properties with two kinds of sliding zone soil: Sanmen group red clay and Hipparion laterite. We sampled of two kinds of sliding zone to analyze the clay contents of two kinds of clay soils by pipette the dispersion method, and to do the X-ray diffraction quantitative test for clay minerals, to observe the microstructure after amplification by scanning electron microscopy, to discriminate the expansibility with Williams expansion criterion, to do the disintegration test with one sample after drying with 105℃ constant temperature and the other sample with natural water content, and to do the indoor slow shear test in both natural and saturated state. The results show that these two kinds of clay soils belong to the medium to strong expansive soil, easily collapse after wetting. There is a great difference between the peak strength and residual strength of two kinds of clay soils. Cohesion is an average reduction of 2/3, and the strength has obvious effect with containing water. The cohesive force decreased by 30% and the internal friction angle decreased by 25%, showing that the peak residual value of the clay causes the larger down thrust when landslides occurs, and leads to instant sliding at high speed sliding along the sliding bed surface.

Keywords: loess landslides; sliding soil; physical properties; internal friction angle; cohesion; Pliocene clay

陕西关中渭北黄土塬南缘是大型黄土滑坡的高发区,宝鸡市金台区市区北坡长 22 km,宽 0.5~0.9 km 的黄土塬边地带分布有滑坡体 27 处,占金台区滑坡总数的 70%。由于这些滑坡仅 1983 年就造成 110 人死

亡。因此,这类大型滑坡带一直受有关学者的关注,并开展了一些研究。胡海涛等^[1]认为河流侵蚀和下切是形成渭北高陡斜坡和大型滑坡发生的外动力因素,黄土下部的三门系黏土是该区域斜坡的易滑地层,现今

斜坡的稳定性与地下水的的作用有关;胡广韬^[2]认为地下水的转换以及渭河周期侧蚀作用诱发了一系列老滑坡,而新滑坡形成与塬边斜坡内地下水作用有关;李滨等^[3-4]认为蠕滑—滑移—拉裂是渭北塬边滑坡的主要变形运动方式,具体破坏模式包括扩展式旋转滑动、渐灭式旋转滑动和复合式旋转滑动。龙建辉等^[5]认为黄土滑坡滑带土的蠕变变形分为 3 个阶段:等速蠕变、加速蠕变和蠕变破坏。李瑞娥^[6]研究了黄土滑坡滑带土的微观与宏观特征、变形破坏模式。

近年来的地质调查发现,渭北黄土塬边厚层黄土下部广泛分布有两类地层,虽然关于这两类地层的时代与成因存在着一定争议,但总体上认为这类地层是上新世末期至早更新世的过渡。地层一类是红色黏土沉积,由于其中发现三趾马动物群,称之为“三趾马红黏土”;另一类是灰黄色、灰绿色、红色黏土、砂质黏土及砂砾石河湖相沉积地层,为三门组沉积(图 1)^[4,7-9]。

这两类地层是渭北黄土塬边大型滑坡的基座,也是滑带地层。因此,选取宝鸡市金台区为研究区域,并通过试验认识 and 对比分析两类地层的成分、结构及物理和力学性质对揭示大型滑坡的发生具有重要的意义。



图 1 渭北黄土塬边大型滑坡滑带地层

1 滑带土的物质组成

研究区的三趾马红土和三门组黏土属于上新世硬黏土,成岩时间短、胶结程度差、强度低,且具有胀缩性,其物质组成和物理化学性质如表 1 所示。

表 1 两类黏土的物质组成和物理化学性质

黏土名称	地点	颗粒组成/%				活性 指标/%	蒙脱石/ %	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	CaCO_3 /%
		>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	<0.002 mm				
	渭河北岸	5.4~13.3	39.3~58.0	30.2~52.9	21.9~45.3	0.4~0.9	14.3~23.6	126.4~236.4	0.2~11.2
三门组黏土	长寿沟	3.2~12.8	48.1~54.9	27.3~48.7	24.4~43.6	0.5~0.8	12.5~22.04	129.6~196.9	1.5~11.6
	金陵河	1.5~21.2	46.5~68.5	31.1~44.3	21.9~36.8	0.5~0.8	10.4~24.6	100.4~207.0	1.5~9.0
三趾马红土	金台	0.1~3.4	45.0~62.7	37.1~54.4	30.2~48.0	0.4~0.8	18.6~27.6	151.2~262.9	0.7~8.0

1.1 粒度成分

通过移液管全分散法粒度分析表明,两类黏土黏粒含量比黄土高,其中三趾马红土黏粒和胶粒含量明显大于三门组硬黏土,三门组黏土的黏粒($<0.005 \text{ mm}$)含量约 35%~45%,最低 27.3%,胶粒($<0.002 \text{ mm}$)含量平均约 26%~40%;三趾马红土的黏粒($<0.005 \text{ mm}$)含量一般在 40%~50%,最低的 37.1%,胶粒($<0.002 \text{ mm}$)含量平均约 32%~45%,最低胶粒含量 30.2%。当然,由于局部沉积环境的差异,不同类型的黏土黏粒含量在垂直和水平方向上常有一定变化,即使同一层硬黏土也会出现这种现象。

1.2 黏土矿物成分

黏土矿物 X 射线衍射定量测试通常采用以下 3 种样品方法处理,然后分别对 3 种样品进行定量测定。(1) $d < 2 \mu\text{m}$ 的悬液制成的定向片样品;(2) 乙二醇饱和处理的 $d < 2 \mu\text{m}$ 的悬液制成的定向片样品;(3) 550℃条件下加热 2 h 的 $d < 2 \mu\text{m}$ 的黏粒制成的定向片样品^[10-13]。黏土矿物组成综合测定结果表明,三门组黏土和三趾马红黏土矿物都是以蒙脱石或伊利石/蒙脱石混层矿物为主,伊利石、高岭石、绿泥石等共生组合(表 2,图 2)。三门组黏土的黏土矿物以伊利石/蒙脱石混层矿物为主,且具有结晶程度差的特点,次要黏

土矿物为伊利石,同时含有少量高岭石、绿泥石等(图 2A)。伊利石/蒙脱石混层矿物占黏土矿物的相对含量的 55%~82%,其混层比约为 45%,属中等混合比矿物,次要矿物伊利石相对含量占 12%~31%,同时伴生 6%~7%左右的高岭石和绿泥石。伊利石/蒙脱石混层矿物占天然干土重的 18.0~23.9%(绝对含量),伊利石占 3.3%~13.5%,高岭石占 1.7%~6.1%。三趾马红土以 Ca—蒙脱石为主,在黏粒中普遍含有伊利石、高岭石(图 2B),其中蒙脱石主要以中—高混层比的伊利石/蒙脱石混层矿物形式存在,混层比为 40%~70%,相对含量 55%~75%,绝对含量 22.0%~34.0%,次要矿物伊利石相对含量 15%~31%,同时伴生的高岭石相对含量 4%~14%,还有少量绿泥石存在。

1.3 结构特征

(1) 微观结构。受沉积环境的影响,两类黏土层中存在大量不同性质、规模和成因的裂隙,包括构造节理裂隙、卸荷裂隙、淋滤裂隙、胀缩裂隙、冻融裂隙和风化裂隙等。裂隙之间的互相穿插、切割形成立体的网络裂隙系统,这些裂隙往往导致黏土工程性质降低。

现场调查发现,黏土层间或与上覆黄土之间发育有明显的层间剪切带,三门组黏土常与砂砾石层交互

沉积,这种组合导致一些软硬程度差异悬殊的层面存在,在外力作用下极易形成层间剪切带,剪切带厚度一般 5~10 cm,总体产状平缓,由于黏土中蒙脱石、伊利石等膨胀性矿物含量较高,因此地下水对层间剪

切带的物理力学性质的弱化作用明显。而三趾马红土与上覆厚层黄土之间存在不整合面,表层受强烈风化剥蚀和侵蚀作用强度降低,黄土覆盖之后在新构造活动环境中极易发生剪切错动,形成层间剪切带。

表 2 两类黏土的黏土矿物定量分析结果

黏土名称	编号	<2 μm/ %	黏土矿物相对含量/%				I/S 混层比/%	黏土矿物绝对含量/%			
			I	I/S	C	K		I	I/S	C	K
三门组黏土	1	43.6	31	55	—	14	45	13.5	23.9	—	6.1
	2	29.0	25	62	6	7	45	7.3	18.0	1.7	2.0
	3	39.0	22	65	7	6	50	8.6	25.4	2.7	2.3
	4	27.6	12	82	—	6	45	3.3	22.6	—	1.7
三趾马红土	1	38.2	26	67	—	7	40	9.9	25.6	—	2.7
	2	37.9	15	75	3	7	55	5.7	28.4	1.1	2.7
	3	33.0	17	72	4	7	45	5.6	23.8	1.3	2.3
	4	36.1	19	72	3	6	45	6.9	26.0	1.1	2.2
	5	38.5	18	76	2	4	55	6.9	29.3	0.8	1.5
	6	31.9	21	69	4	6	40	6.7	22.0	1.3	1.9
	7	35.0	22	63	7	8	40	7.7	22.1	2.5	2.8
	8	42.5	31	55	—	14	70	5.2	34.0	—	2.6

注:I/S为伊利石、蒙脱石混层矿物,I为伊利石,K为高岭石,C为绿泥石。

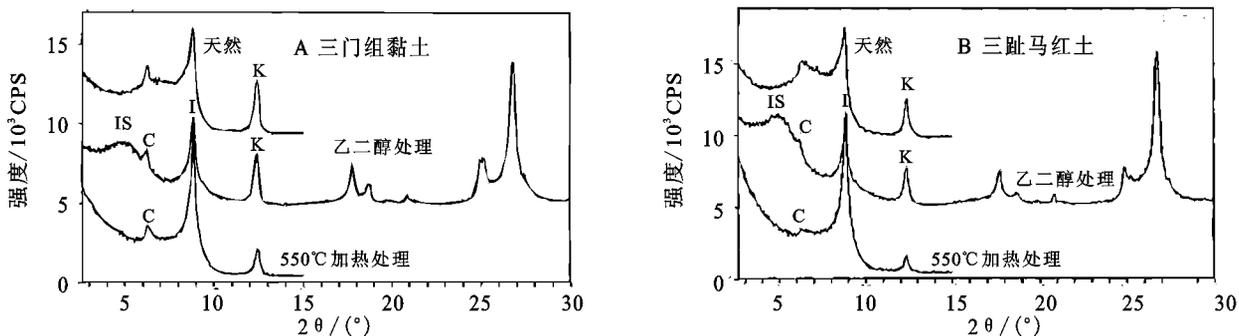


图 2 两类黏土 X 射线衍射曲线

(2) 微观结构。谭罗荣等^[14]将膨胀土中的微观结构分为 6 种类型:絮凝结构、定向排列结构、粒状堆积结构、胶粘结构、紊流结构和复合结构。对于大多数膨胀性硬黏土而言,微观结构往往是几种结构的综合^[15-16]。

研究区黏土样品经扫描电镜放大 2 000 倍,其试验结果显示(图 3—4),三门组黏土的微观结构类型主要有絮凝结构、胶粘结构、紊流结构和复合结构;三趾马红土的微观结构类型主要有絮凝结构、定向排列

结构和复合结构。由于黏土黏粒含量高,黏土矿物以蒙脱石或中高混合比的伊利石/蒙脱石混层矿物为主,高岭石含量较少,因此粒状堆积结构较少。从扫描电镜试验结果可以看出,黏土的微观结构格架中微孔隙或微裂隙较为发育,为水的下渗提供通道,当水入渗时,呈边一面、面一面紧密叠置的蒙脱石、伊利石黏粒片吸水,水化膜增厚膨胀,反之,水分蒸发流失,黏粒片水膜减薄收缩,这就是膨胀土胀缩的微观结构表现。

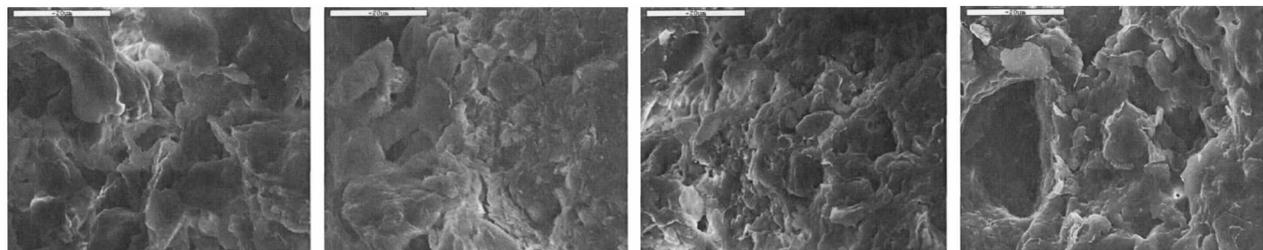


图 3 三门组黏土样品扫描电镜试验结果

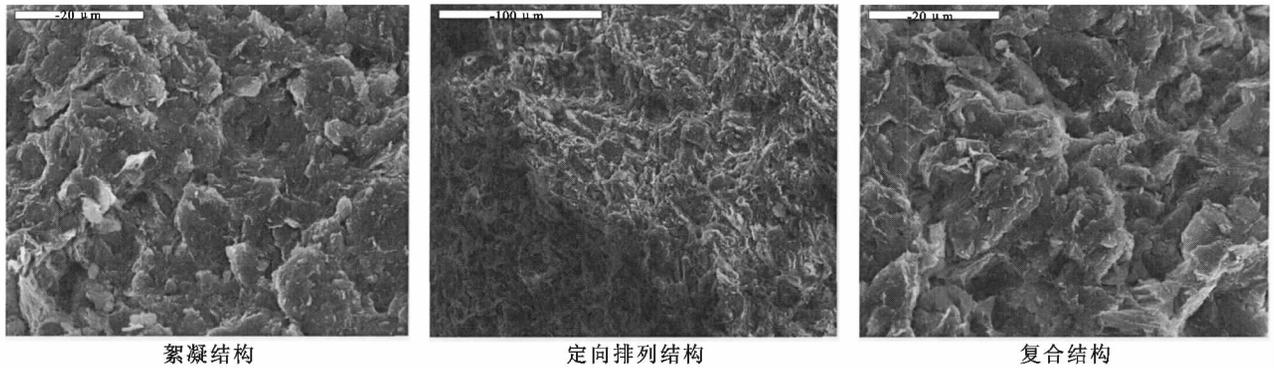


图 4 三趾马红土样品扫描电镜试验结果

2 滑带土的物理特性

2.1 物理性质

从表 3 中可以看出,三门组黏土的天然含水量为 12.3%~24.2%,平均 17.5%,三趾马红土天然含水量为 12.1%~20.5%,平均 16.0%;三门组黏土的天然容重 1.9~2.2 g/cm³,平均 2.0 g/cm³,干容重 1.7~1.8 g/cm³,平均 1.7 g/cm³,孔隙比 0.4~0.7,平均 0.6,三趾马红土天然容重 2.0~2.1 g/cm³,平均 2.1 g/cm³,

干容重 1.6~1.9 g/cm³,平均 1.8 g/cm³,孔隙比 0.4~0.6,平均 0.5。可以看出,两类黏土天然含水量都较高,且比较接近,与中新世泥岩相比密度较低,说明固结较差,高含水量和低密度预示着黏土一般具有较低的强度。三门组黏土液限 27.2%~49.9%,平均 38.9,塑性指数 13.7~23.0,平均 18.4,液性指数 -0.4~-0.2,平均 -0.2;三趾马红土液限 36.7%~57.3%,平均 44.1,塑性指数 17.8~33.0,平均 23.3,液性指数 -0.5~0.1,平均 -0.2,均为硬黏土。

表 3 两类黏土物理性质测试统计表

粘土类型	含水量/%	容重/ (g·cm ⁻³)	干容重/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性 指数	液性 指数	自由膨胀 率/%	无侧限抗 压强度/MPa
三门组黏土	12.3~24.2 (17.5)	1.9~2.2 (2.0)	1.7~1.8 (1.7)	0.4~0.7 (0.6)	27.2~49.9 (38.9)	16.4~24.4 (20.8)	13.7~23.0 (18.4)	-0.4~-0.2 (-0.2)	35~46 (41)	0.59~1.8 (1.1)
三趾马红土	12.1~20.5 (16.0)	2.0~2.1 (2.1)	1.6~1.9 (1.8)	0.4~0.6 (0.50)	36.7~57.3 (44.1)	17.7~24.3 (20.8)	17.8~33.0 (23.3)	-0.5~0.1 (-0.2)	58~77 (65)	0.33~1.1 (0.6)

注:括号内数据为平均值。

2.2 膨胀性

采用了威廉姆斯膨胀判别法^[8-11]进行判别(图 5),结果表明,上新世三门组黏土和三趾马红土都属于中等—强膨胀性土。

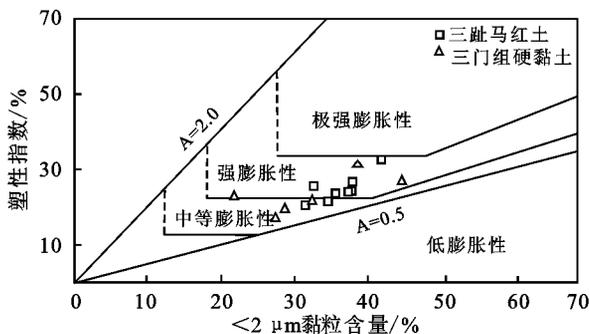


图 5 两类黏土膨胀势判别图

2.3 崩解性

采用 105℃ 恒温烘干后的试样和天然含水量的试样放入注入清水的容器中进行试验(图 6),观察试块随时间碎裂的过程。结果表明,两类黏土在干燥和天然状态下的崩解性极强,干燥试样的崩解速度更快,崩解

耐久性极差,三趾马红土和三门组硬黏土干燥试样在 1 h 内全部崩解,天然试样则在 6 h 内全部崩解。三趾马红土和三门组黏土的黏土矿物多以蒙脱石或伊利石/蒙脱石混层这种亲水性强、膨胀性强矿物为主、伊利石、高岭石、绿泥石等共生组合,胶结程度差,伴有裂隙及微裂缝存在,因此水入渗孔隙或裂隙时,细小颗粒的吸附水膜便会增厚,引起土体体积的膨胀,在土体内部就产生不均匀应力,部分胶结物会被稀释、软化或溶解,继而导致土体颗粒的碎裂解体。

3 强度参数

为了全面了解两类黏土作为滑带土的强度特性,结合区域滑带土的发育特点,对天然状态和饱和状态下的上新世三门组黏土和三趾马红土进行相应的直剪试验,试验采用南京土壤仪器厂生产的 DSJ-2 型电动四联等应变直剪仪,采用慢剪法,剪切速率 0.02 mm/min,垂向压力分别为 100,200,300,400 kPa,每次剪切位移 8 mm。

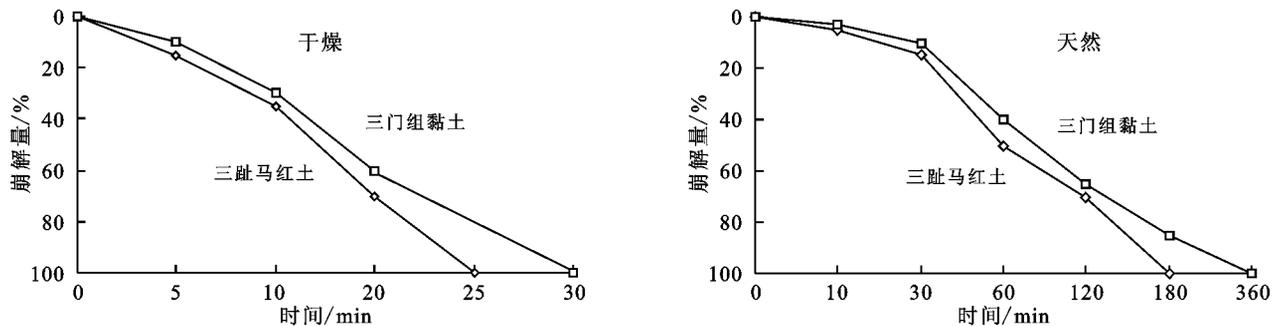


图 6 两类黏土崩解试验曲线

试验进行了天然和饱和情况下的室内慢剪试验, 三门组黏土和三趾马红土试验土样的主要物理性质指标和抗剪强度指标见表 4, 抗剪强度曲线如图 7—8 所示。天然含水率条件下, 三门组黏土和三趾马红土

的强度相对较高, 而饱和后, 粘聚力和内摩擦角均明显降低, 而两种状态下的残余强度更低, 粘聚力平均降低 2/3, 这对于滑坡而言, 提供了滑坡所形成的软弱地层, 从而形成滑带。

表 4 两类黏土慢剪试验的抗剪强度指标

土样	天然状态				饱和状态			
	峰值(均值)		残余(均值)		峰值(均值)		残余(均值)	
	C/kPa	$\varphi /(^{\circ})$						
三门组黏土	128.2	34.9	36.1	22.7	98.5	28.1	32.6	17.4
三趾马红土	115.1	34.3	48.9	21.2	75.6	26.4	29.4	15.6

注:表中数值均为 10 组以上试验参数平均值。

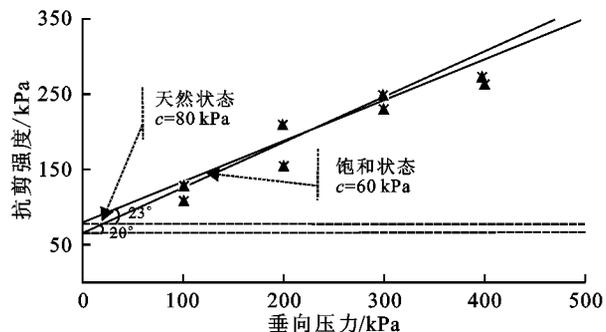


图 7 上新世三门组硬黏土的抗剪强度曲线

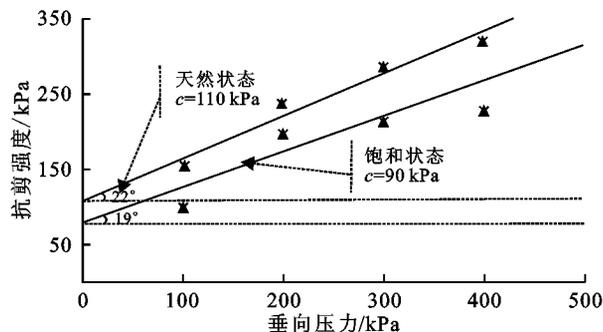


图 8 三趾马红土的抗剪强度曲线

试样剪应力 (τ)—剪切位移 (u) 曲线如图 9—10 所示。

(1) 不论是较高的正应力还是较低的正压力作用, 天然和饱和含水状态下三门组硬黏土变形曲线为强软化型, 即当应变达到一定值时, 应力达到峰值点,

随后应变再增加而应力减小, 存在一个残余强度; (2) 在较高或较低的正应力作用下, 天然和饱和状态下的三趾马红土的剪应力 (τ)—剪切位移 (u) 曲线为软化型, 应力达到峰值点, 随后应变再增加而应力减小趋势欠明显。

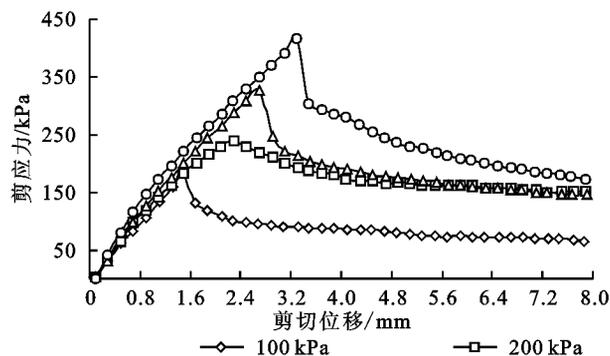
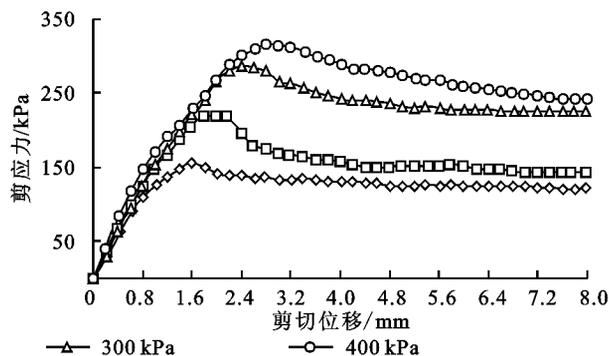


图 9 上新世三门组硬黏土的剪应力 (τ)—剪切位移 (u) 曲线



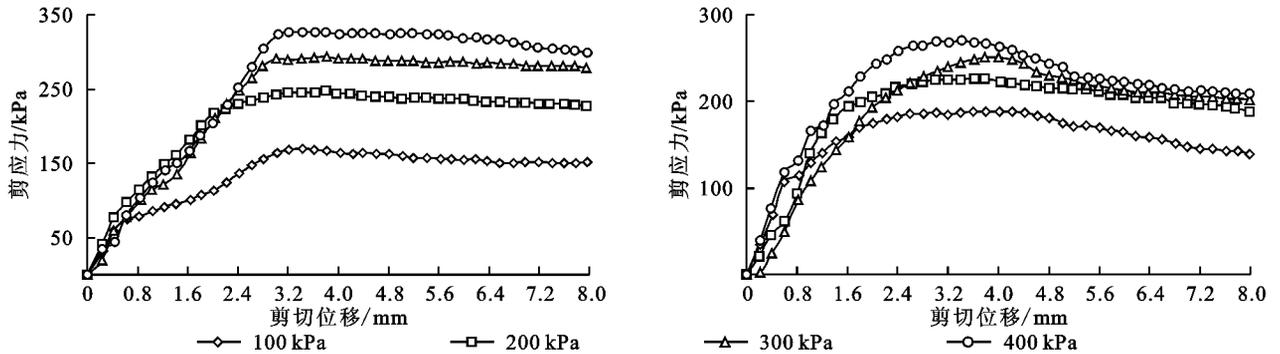


图 10 三趾马红土的剪应力(τ)—剪切位移(u)曲线

4 结论

(1) 两类黏土成岩时间短,胶结程度差、强度低、具有明显的胀缩特性。黏土普遍具有黏粒含量高的特点,三门组黏土的黏粒含量约 35%~45%,三趾马红土的黏粒含量一般约为 40%~50%;黏土矿物测试表明,两类黏土都是以蒙脱石或伊利石/蒙脱石混层矿物为主,由于蒙脱石或伊利石/蒙脱石混层矿物都属于膨胀性黏土矿物,因此黏土的膨胀性是比较显著的。

(2) 从细观和微观角度来看,两类黏土中普遍存在大量裂隙,这为地下水的下渗提供通道,从而导致胀缩现象出现。

(3) 从黏土的物理性质来看,黏土天然含水量较高,固结较差,而且属于中等—强膨胀性土,而且遇水极易崩解,强度会迅速降低。

(4) 黏土的慢剪试验来看,两类黏土峰值强度和残余强度差值很大,仅粘聚力而言,平均降低 2/3;含水量对硬黏土的强度影响也十分明显,饱和状态下,两类硬黏土强度较天然状态内聚力下降 30%左右,内摩擦角下降 25%左右,主要原因是一方面随含水量的增加,结合水膜的粘滞阻力减小,使得颗粒间的摩擦力随之降低,另一方面,当原状土饱和后,电桥连接被削弱,可溶盐逐步溶解,因而使得结构强度迅速降低。因此,滑坡发生时,黏土的峰残差值形成较大的下滑推力,导致滑体沿着滑床面瞬间高速滑动,这很好地解释了渭河北岸大型高速的多级旋转滑坡产生的原因。

致谢:本研究得到中国地质科学院地质力学研究所李滨副研究员(博士)的大力支持,在此表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 胡海涛,项式均,王肇芬,等. 关中西部滑坡的结构、构造特征及稳定性分析[J]. 地质学报,1965,45(4):435-465.
- [2] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社,1995.
- [3] 李滨,殷跃平,吴树仁,等. 多级旋转黄土滑坡基本类型及特征分析[J]. 工程地质学报,2011,19(5):703-711.
- [4] 李滨,吴树仁,石菊松. 渭北黄土塬区滑坡发育特征及分布规律研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):212-216.
- [5] 龙建辉,郭文斌,李萍,等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特征[J]. 岩土工程学报,2010,32(7):1023-1028.
- [6] 李瑞娥. 黄土滑带土的研究[D]. 西安:西北大学,2005.
- [7] 孙广忠. 西北黄土的工程地质力学特性及地质工程问题研究[M]. 兰州:兰州大学出版社,1989.
- [8] 刘传正,张明霞,邹正盛,等. 宝鸡市狄家坡滑坡稳定性研究[J]. 工程地质学报,1998,6(2):93-103.
- [9] 李滨,吴树仁,石菊松,等. 陕西宝鸡市三趾马红土工程地质特性及灾害效应[J]. 地质通报,2013,32(12):1918-1924.
- [10] 张永双,曲永新. 秦岭北缘仙游寺黏土(膨胀土)的发现及初步研究[J]. 现代地质,2004,18(3):383-388.
- [11] 张永双,曲永新. 南水北调中线工程上第三系膨胀性硬黏土的工程地质特性研究[J]. 工程地质学报,2002,10(4):367-377.
- [12] 曲永新,张永双,覃祖森. 三趾马红土与西北黄土高原滑坡[J]. 工程地质学报,1999,7(2):257-265.
- [13] 张永双,曲永新. 鲁西南地区上第三系硬黏土的工程特性及其工程环境效应研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(4):445-449.
- [14] 谭荣荣,张梅英,邵梧敏,等. 灾害性膨胀土的微结构特征及其工程性质[J]. 岩土工程学报,1994,16(2):48-57.
- [15] 高国瑞. 中国黄土微结构[J]. 科学通报,1980(2):945-948.
- [16] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学,1980(12):1203-1208.