

文章编号: 1008-2786-(2015)2-240-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000031

# 植被发育斜坡土体物理力学特性

张磊<sup>1</sup>, 徐则民<sup>2\*</sup>, 张露月<sup>2</sup>, 张燕廷<sup>2</sup>, 侯汝几<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学地球科学系, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学土木系, 云南 昆明 650500)

**摘 要:** 头寨植被发育斜坡土体具有高含水率、大孔隙比、富含有机质等类似软土的基本物理性质。然而, 与不同沉积相软土的压缩性对比, 头寨土  $e - \lg p$  曲线没有明显的结构屈服强度  $p - p$  曲线不适用双曲线模型, 也没有“倒大”的现象, 压缩模量极小且有随深度递增的规律。头寨土剪应力 - 剪切位移曲线普遍无峰值, 属于土样应变硬化的情况, 年最低含水率 > 100%、平均 > 150% 的超高含水率, 使得土体具有极强的延性和变形性能。利用 Image J 对团聚体 SEM 照片分析表明, 团粒的圆形度平均 65%、复杂度平均 42%、各向异性率平均 25%, 主定向角在 0 ~ 360° 之间变化, 具有很好的“支架”结构, 但团粒的“支架”作用并未体现。高含水率及团粒结构的特点, 决定了头寨土压缩过程中孔隙水压力自始至终起到双重作用, 即增大抗压性的同时也使得土中孔隙连通性增大, 更容易压缩变形。

**关键词:** 植被发育斜坡; 滑坡; 物理力学特性; 有机质

**中图分类号:** P642.1, TU41

**文献标志码:** A

形成于湖泊、河流及三角洲等沉积环境的结构性软土是一种重要而特殊的土体类型, 许多学者对其物理力学特性进行过多方面的深入研究。张诚厚<sup>[1]</sup>、J. B. Burland<sup>[2]</sup>、沈珠江<sup>[3]</sup>、F. Cotecchia 等<sup>[4]</sup>都研究过不同地区不同相结构性软土的物理力学特性, 压缩试验研究结果一致表明: 结构性软土具有明显的结构屈服应力。

植被发育斜坡表层土体往往富含有机质, 具有团粒结构, 其物理力学特性不仅对可能诱发深层滑坡的降雨入渗过程具有重要影响, 而且对浅层滑坡的发生具有重要控制作用, 但既有研究却少有涉及。本文采用现场调查、室内试验及动态监测等方法, 以云南昭通头寨滑坡滑源区左侧斜坡为对象, 对植被发育斜坡土体的物理力学特性进行了较为系统的研究。

## 1 研究区概况

头寨沟地处扬子准地台 - 滇东北台褶带 - 滇东北台褶曲 - 镇雄拗褶带, 实验区地质构造简单, 主要以向斜为主。试验区下伏基岩为二叠纪峨眉山玄武岩( $P_2\beta$ ), 土层厚度在 50 ~ 100 cm 变化。该区地下水发育, 属玄武岩风化裂隙水, 受大气降水和融雪补给, 常年有地下水出露。

头寨沟试验区植被覆盖度在 95% 以上, 调查发现 31 种植物: 滇白杨(*Populus rotundifolia* var. *bonati*)、云南柳(*Salix cavaleriei*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、滇蜡瓣花(*Corylopsis yunnanensis*)、大白花杜鹃(*Rhododendron decorum* Fr.) 等。

收稿日期(Received date): 2014-06-09; 改回日期(Accepted): 2014-10-09。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金 - 云南联合基金重点项目(U1033601)、高等学校博士学科点专项科研基金(20135314110005)。

[The National Natural Science Foundation of China - Yunnan Joint Fund and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China.]

作者简介(Biography): 张磊(1987-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事水文地质与工程地质方面研究。[Zhang Lei (1987-), male, graduate candidate, majoring in hydrogeology and engineering geology research.] E-mail: zlz5201@126.com

\* 通信作者(Corresponding author): 徐则民(1963-), 教授, 博士生导师, E-mail: abc5100@188.com

2 土体物理性质

2.1 含水率

在研究区,我们建立了气象站以及地表三角堰,长期监测头寨沟“微气候环境”,另外,还搜集了国家气象部门关于昭通的气象监测资料,双方资料均显示:头寨 12 月至次年 2 月为旱季,7 月至 9 月为雨季。对斜坡不同深度处土体含水率(质量含水率)长期监测结果(图 1)显示,雨季和旱季的交替变化,对斜坡土体的含水率没有多大影响,甚至有旱季土体含水率大于雨季的反常现象,这除了与区域地质环境有关外,很大程度上决定于植被发育斜坡土体具有很好的持水性。

2.2 有机质含量

在头寨研究区,选择植被发育的典型斜坡,人工开挖深度 >1 m 的探坑,在顺坡剖面按间隔 15~20 cm 取样,试样送至云南地质矿产勘察开发局中心实验室,采用重铬酸钾容量法进行测定,测定结果如图 2 所示。

2.3 其余物理性质指标

在研究区探坑取样,按照《土工试验方法标准》GB/T50123-1999 测定基本物理性质指标,几年来,取样测试数十次,求得平均值见表 1。可以看出,头寨土基本物理性质类似软土,甚至更加特殊,为此,对比文献<sup>[1]</sup>中淤泥质粘土的研究数据(表 2)。

3 土的定名及状态判断

对比表 1、表 2,头寨土孔隙比远大于上海、湛江

两地淤泥质粘土,天然密度相对较小,头寨土体基本物理性质类似软土,甚至平均 0.45 g/cm<sup>3</sup> 的极低干

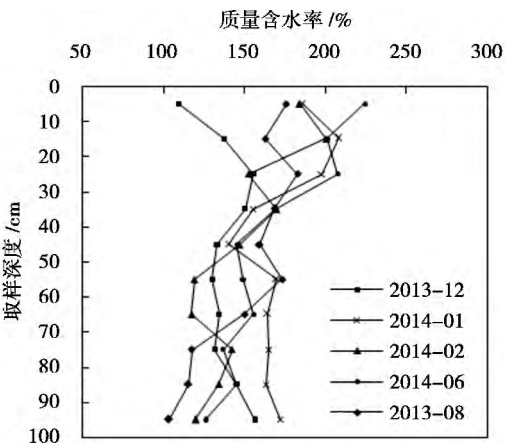


图 1 头寨土含水率

Fig. 1 Moisture content of Touzhai soil

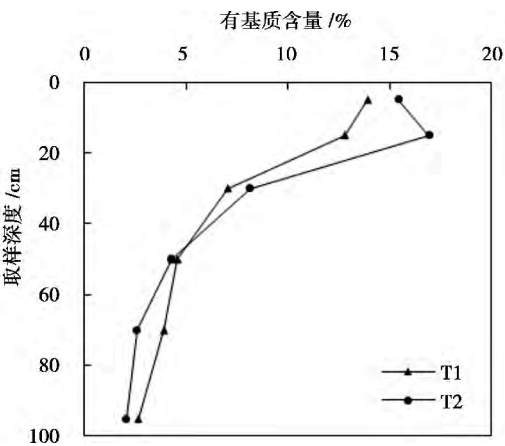


图 2 头寨有机质含量随深度变化曲线

Fig. 2 Curves of soil organic matter content of Touzhai with depth at test area

表 1 头寨试验区不同深度试样物理性质

Table 1 Physical properties of test samples at different depth of test area

| 试样<br>编号 | 取土深度<br>/cm | 天然密度<br>$\rho_0/(g/cm^3)$ | 干密度<br>$\rho_0/(g/cm^3)$ | 孔隙比<br>$e$ | 液限<br>$\omega_L/\%$ | 塑限<br>$\omega_P/\%$ | 塑性指数<br>$I_P$ | 比重<br>$G_s$ |
|----------|-------------|---------------------------|--------------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------|-------------|
| TZ1      | 10~20       | 1.1                       | 0.38                     | 4.6        | 75.6                | 58.5                | 17.1          | 2.1         |
| TZ2      | 60~80       | 1.3                       | 0.55                     | 3.5        | 60.9                | 49.9                | 11            | 2.5         |

表 2 不同地区软粘土平均物理性质指标<sup>[1]</sup>

Table 2 Average physical properties index of soft clay at different regions<sup>[1]</sup>

| 试样   | 取土深度<br>/m | 天然含水率<br>$\omega_0/\%$ | 天然密度<br>$\rho_0/(g/cm^3)$ | 孔隙比<br>$e$ | 液限<br>$\omega_L/\%$ | 塑限<br>$\omega_P/\%$ | 塑性指数<br>$I_P$ |
|------|------------|------------------------|---------------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 上海粘土 | 8~13       | 49.9                   | 1.7                       | 1.4        | 42.2                | 22.5                | 19.7          |
| 湛江粘土 | 19~23      | 52.3                   | 1.7                       | 1.4        | 60.1                | 28.2                | 31.9          |

密度和平均 3.5 的超大孔隙比较软土更为特殊。可见,头寨土体是地表地质体中罕见的类似“轻质材料”、“多孔泡沫材料”的特殊地质介质。

### 3.1 定名

《岩土工程勘察规范》GB50021-2001,以及工程地质手册等对软土是这样定义的:天然孔隙比 $\geq 1.0$ ,且天然含水率 $>$ 液限的细粒土,包括有机质土(淤泥质土、淤泥)、泥炭质土、泥炭等。将粒径 $>0.075$  mm的颗粒质量不超过总质量的 50%,且 $I_p \leq 10$ 的土,定名为粉土,将 $I_p > 10$ 的土定名为粘性土。显然,头寨土属于软粘性土。在此,笔者呼吁将植被发育斜坡土(例如头寨土)作为一种特殊土对待。李生林等<sup>[5]</sup>搜集到遍及全国各地 11 处不同地区的 40 000 余组试验资料,并将其表现在塑性图上,他认为将国外土质分类中普遍采用的塑性图应用于我国细粒土分类是完全可行的。对头寨土样实验结果做出塑性图(图 3),所有点落于 A 线下方。卡萨格兰德曾将 A 线以上的土定名为粘土(Clay),A 线以下的土定名为粉土(Silt),然而,国内外大量事实证明这种分类是不完全准确的<sup>[5]</sup>。

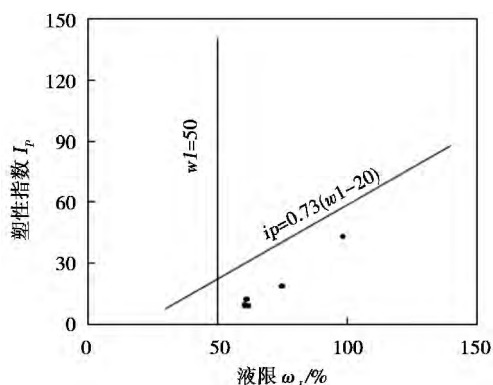


图 3 头寨土塑性图

Fig. 3 Plasticity chart of Touzhai soil

头寨土塑性图中各点落于 A 线以下的原因可以用微观结构特征予以解释<sup>[5]</sup>:头寨土体中富含有机质,使得大部分黏粒积聚起来形成团聚体,团聚体颗粒之间及其内部毛细孔隙极其发育,致使土体具有极高的孔隙比、干密度极小等特点。毛细孔隙中充填的水对塑性指标的测定影响颇大。对于普通细粒土来说,塑限大体上相当于吸附在土粒表面上的最大分子水容度,此含水率再加上水化膜充分发育时的渗透吸收水可相当于液限。而对于毛细孔隙极其发育的土,实测的塑限除最大分子水容度在内的吸附结合水外,尚包括一部分微毛细孔隙水,从而使

得其塑性指数偏低,落于 A 线之下,而并不是说土中以粉粒为主。可见,头寨土定为具有团粒结构的软粘性土。

### 3.2 状态

现行《岩土工程勘察规范》GB50021-2001 等,将粘性土状态按照液性指数划分为: $I_L \leq 0$ (坚硬); $0 < I_L \leq 0.25$ (硬塑); $0.25 < I_L \leq 0.75$ (可塑); $0.75 < I_L \leq 1$ (软塑); $I_L > 1$ (流塑)五个状态,头寨土含水量均 $>$ 液限,液性指数均 $>1.0$ 。按液性指数判断应属流塑状态,而现实中头寨土是可塑状态。

肖建华、冯铭璋等<sup>[6]</sup>对上海第③层淤泥质粉质粘土、第④层淤泥质粘土做了试验研究,两层土均具有高含水率、高孔隙比、高压缩性、富含有机质等特征,其含水率均大于液限。按液性指数分类均应属流塑状态,但是,这些土层中所采取的土样的天然状态并非呈“在自重作用下能改变自己的形状似浆糊”的流塑状态。

由此可见,液性指数( $I_L$ )在判别粘性土的状态应用时确实存在局限性,粘性土团粒间的胶凝作用等产生的结构强度常使它呈较完整良好的软塑或软可塑状态。测试液、塑限过程中破坏了土的天然结构,使粘性土失去了其力学强度及得以维持的状态特征。因此, $I_L$ 不能作为土的天然状态的判断依据。

在这里,我们建议以现场编录资料中对土体状态的描述为准。

## 4 压缩特性

节 2 中我们就提到张诚厚等对各地软土的研究,他们大多研究过压缩特性,结果均表明:不同相的软粘性土大都具有明显的结构屈服应力。

在头寨研究区,选择植被发育典型斜坡,人工开挖深度 $>1$  m 的探坑,在顺坡剖面按深度间隔 10 cm 取原状样,编号为 TZ-1 至 TZ-10,按照《土工试验方法标准》GB/T50123-1999 对土样做标准压缩试验,以 24 h 间隔加荷,得到  $e-p$  曲线等。

### 4.1 关于结构屈服强度

目前,关于结构屈服破坏没有明确的定义,有的学者根据屈服后天然土压缩曲线逐渐与重塑土趋于一致的事实,提出结构性的影响是逐渐丧失而破坏的<sup>[7-8]</sup>;而有的学者却持不同的观点<sup>[9-10]</sup>,认为到达固结屈服压力时结构性的影响完全丧失,屈服后天然土的压缩性与土结构性无关。

4.2 关于双曲线本构关系

结构土的本构模型是国内外岩土工程界的热点和重点研究课题,沈珠江等<sup>[11-12]</sup>、洪振舜等<sup>[13]</sup>在这方面做了大量研究。

徐金明等<sup>[14]</sup>等对上海明珠线等工程地基土的 5 000 多条压缩试验曲线进行了数据拟合,发现双曲线模型拟合压缩曲线具有很好的一致性;刘保健等<sup>[15]</sup>也根据大量试验资料分析发现,采用双曲线模型能够较好的模拟土的压缩应变与应力的关系。此外,彭长学等<sup>[16]</sup>也根据某实际工程的 8 条试验曲线,验证了双曲线模型拟合土的压缩曲线的合理性。

前人对粉土、粘土、淤泥以及软土等进了大量的研究,结果都表明双曲线模型具有良好的适用性,其中双曲线模型对于软土的适用性更强。

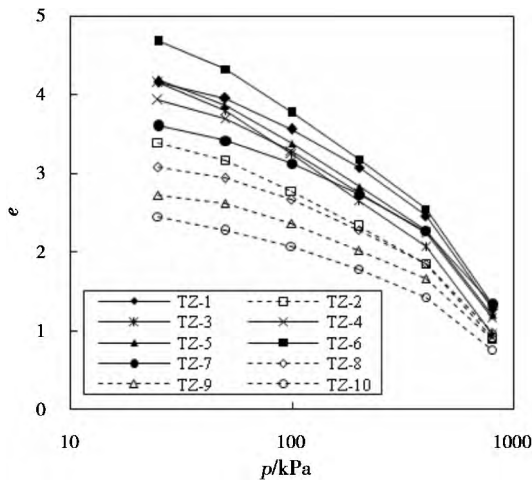


图 4 头寨土  $e - \lg p$  曲线

Fig.4 The  $e - \lg p$  curve of Touzhaisoil

从图 4 可知,头寨土  $e - \lg p$  曲线没有明显的拐点,所以,头寨土压缩过程中,结构性的影响是逐渐丧失的。

双曲线方程最早被 Kondner<sup>[17]</sup>用来表示土的压缩应变  $\varepsilon_i$  和  $p$  压力之间的关系,用函数关系式表达则是

$$\varepsilon_i = \frac{p}{A + Bp} \tag{1}$$

式中  $\varepsilon_i$  为土的压缩应变;  $p$  为压缩应力;  $A$  和  $B$  为函数的特征参数。而

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i(1 + e_0) \tag{2}$$

由(2)式得到

$$\varepsilon_i = \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0} \tag{3}$$

所以,考虑  $e - p$  曲线是否也适用于双曲线函数模型。联立(1)和(3)得到

$$e_i = e_0 - \frac{p(1 + e_0)}{A + Bp} \tag{4}$$

为了确定参数  $A、B$ ,令

$$y = \frac{1 + e_0}{e_0 - e_i} = \frac{1}{\varepsilon_i} \tag{5}$$

$$x = \frac{1}{p} \tag{6}$$

则式(4)变为

$$y = Ax + B \tag{7}$$

此时,用最小二乘法求模型参数  $A、B$ (表 3)。

表 3 头寨土双曲线模型参数

Table 3 Hyperbolic model parameters of Touzhai soil

| 编号 | 深度/cm | A      | B    | R <sup>2</sup> |
|----|-------|--------|------|----------------|
| 1  | 5     | 400.54 | 1.79 | 0.993          |
| 2  | 15    | 415.82 | 1.29 | 0.999          |
| 3  | 25    | 204.97 | 1.53 | 0.997          |
| 4  | 35    | 426.28 | 1.43 | 0.999          |
| 5  | 45    | 350.26 | 1.33 | 0.998          |
| 6  | 55    | 345.77 | 1.32 | 0.998          |
| 7  | 65    | 333.14 | 2.24 | 0.988          |
| 8  | 75    | 646.31 | 1.21 | 0.999          |
| 9  | 85    | 714.69 | 1.21 | 0.996          |
| 10 | 95    | 656.05 | 0.78 | 0.983          |

对比实测  $e - p$ (算数坐标)和双曲线模拟结果如图 5。

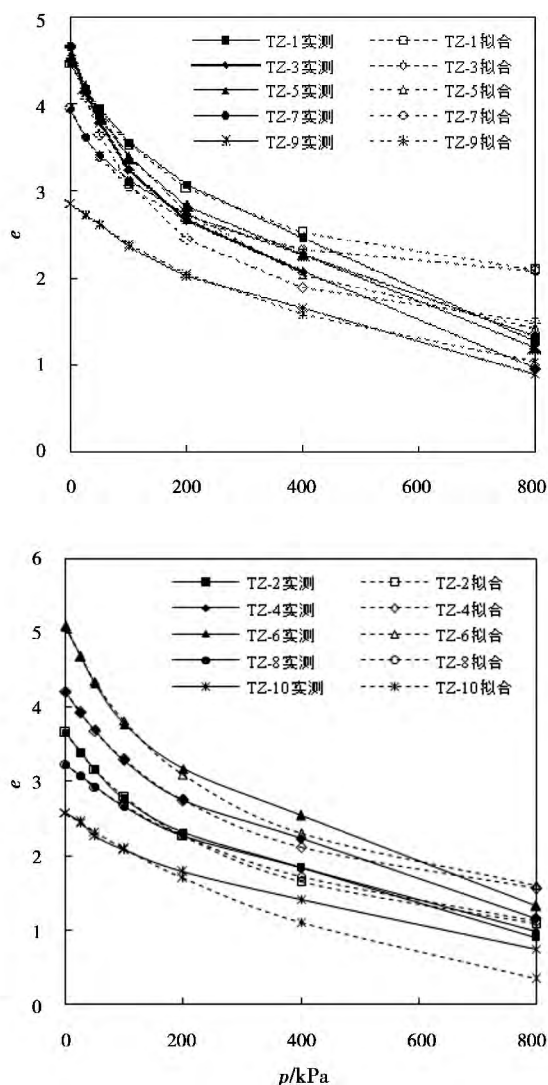
由图 5 可见,头寨土不适用双曲线模型。

冯铭璋<sup>[18]</sup>现场室内土工试验发现软土的  $e - p$  压缩曲线经常出现曲线前部斜率偏小的“异常”现象,土工试验人员称为压缩系数“倒大”现象。据统计在快固结试验时,“异常率”占 50%;进行加荷 24 h 的慢固结试验时“异常率”达 65.2%。这是土的结构性及结构强度在软粘性土的状态、变形性特征中所起的作用的体现。

观察图 5,头寨土  $e - p$  曲线也没有“倒大”现象,“倒大”现象如图 6 所示。

4.3 压缩模量的特殊性

关于压缩模量的公式,在现行《土工试验方法标准》GB/T50123 - 1999 以及《建筑地基基础设计规范》GB - 50007 - 2011 等规范和行业标准中是这样写的

图5 头寨土  $e-p$  曲线的实测与拟合对比Fig.5 The comparison between the test  $e-p$  curve and calculated of Touzhai soil

$$E_{S(i \sim i+1)} = \frac{1 + e_0}{\alpha_{v(i \sim i+1)}} \quad (8)$$

式中  $E_S$  为某压力范围内的压缩模量 MPa;  $e_0$  为初始孔隙比;  $\alpha_v$  为相应压力范围内的压缩系数  $\text{MPa}^{-1}$ 。但高大钊<sup>[19]</sup>等、覃震林<sup>[20]</sup>、徐树人<sup>[21]</sup>等则认为这个公式不符合土力学的压缩定律,与固结试验得到的非线性  $e-p$  曲线的客观现象不符,也不方便计算地基沉降,正确的表达式应该是

$$E_{S(i \sim i+1)} = \frac{1 + e_i}{\alpha_{v(i \sim i+1)}} \quad (9)$$

安民<sup>[22]</sup>等用两种表达式对某试验数据处理后结果差异明显,结果显示用(9)式计算结果 < (8)式,这是由于  $e_0 > e_i$ ,因此,按(9)式计算偏于保守,误差大时,对评价土的压缩性和计算地基变形量影响较大。

本文旨在研究植被发育斜坡土体压缩特性及其影响因素,采用(8)式计算。

从图7可以看出头寨土的压缩模量极小,并且随深度变化的线性规律明显。

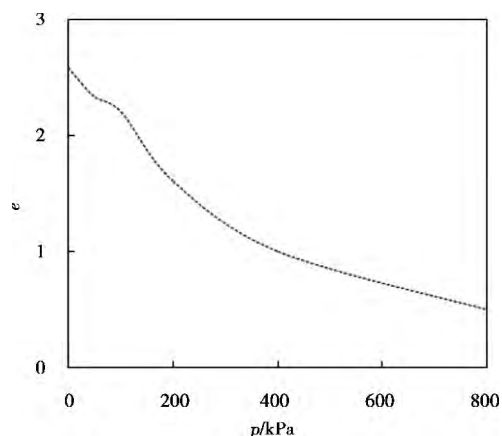
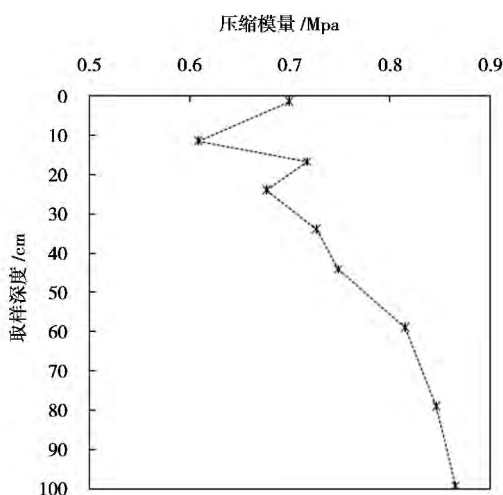
图6  $e-p$  曲线“倒大”Fig.6 “Inverted big” of  $e-p$  curve

图7 头寨土压缩模量随深度的变化曲线

Fig.7 Curve of compression modulus with depth of Touzhai soils

## 5 强度特性

同样地,在头寨研究区选择典型试验点,由表层向深层以 30~40 cm 间距不等开挖试坑取原状环刀样,按照 TZ1(0~30 cm)、TZ2(30~60 cm)、TZ3(60~100 cm) 对各组试样编号,每组 4 个试样(分别在法向荷载 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 下剪切),尽量做到质地均匀,试样含水率极高(平均 > 150%),依据《土工试验方法标准》GB/T50123-1999 应进行慢剪试验(CD)。但由于较高的压缩

性, 导致依据普通细粒土加载方法施加 1 级或几级荷载后, 因压缩量过大、剪切面过低而无法进行剪切, 故而采用 0.8 mm/min 的速率剪切, 剪应力 - 剪切位移及库伦曲线见图 8, 表 4 给出了各组试样的抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值。

观察图 8, 剪应力 - 剪切位移曲线普遍无峰值。

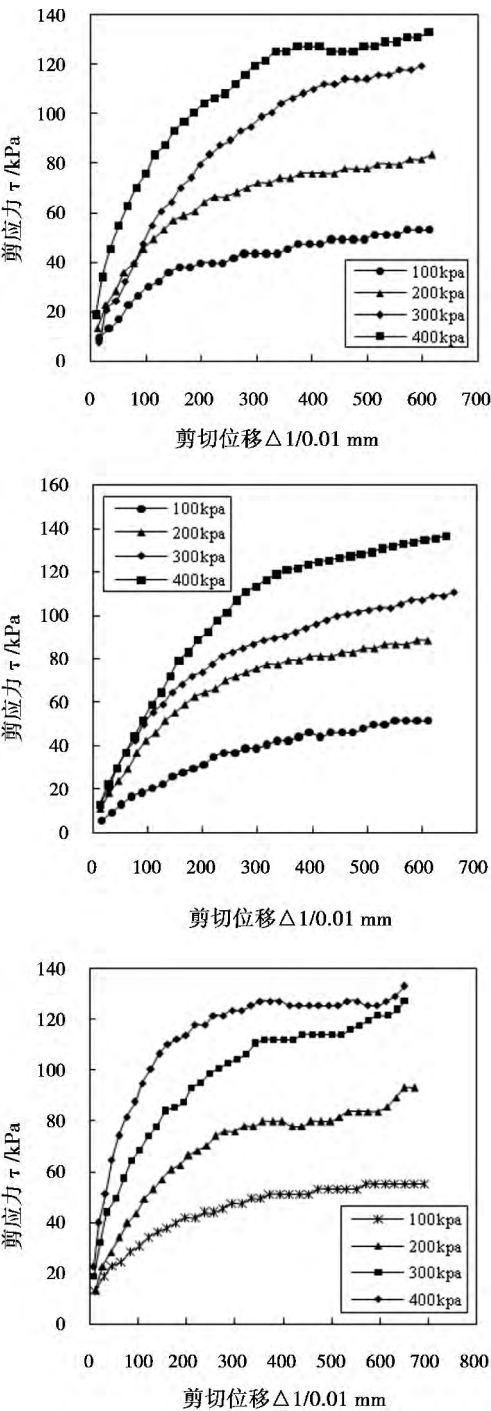


图 8 头寨土剪应力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 8 Curve of shear stress-shear displacement of Touzhai soils

这应属于土样应变硬化的情况, 即随着应力的增加, 应变也不断增加, 由于软粘性土弹塑性变形的特点, 依据弹塑性理论, 随着应变增加, 应力空间中的屈服面不断扩大。此外, 年平均  $>150\%$  的超高含水率, 使得土体具有极强的延性和变形性能。

依据《土工试验方法标准》GB/T50123 - 1999 中剪应力 - 应变曲线中无峰值时, 以剪切位移 4 mm 处对应的剪应力作为抗剪强度这一经验, 得到各级法向荷载下的抗剪强度, 然后利用库伦定理求得头寨土体  $c$ 、 $\varphi$  值, 见表 4。由表可见, 与一般软土相比  $c$  值相对较大, 这充分说明了土体中高含水率以及高含量的有机质(最高达 15%)使得土体延性增大、变形能力增强的特性。而  $\varphi$  值与一般软土接近。

表 4 头寨土体  $c$ 、 $\varphi$  值

Table 4 The  $c$  and  $\varphi$  of Touzhai soils

| 试样  | 取样深度/cm  | $C$ /kPa | $\varphi/^\circ$ |
|-----|----------|----------|------------------|
| TZ1 | 0 ~ 30   | 21.82    | 15.28            |
| TZ2 | 30 ~ 60  | 24.48    | 14.04            |
| TZ3 | 60 ~ 100 | 27.52    | 14.58            |

另外, 由图 8 还可以看出, 剪应力 - 剪切位移曲线拐点似乎更多出现在 2 ~ 3 mm 剪切位移处, 此处对应的剪应力应该更接近于土体抗剪强度。建议对《土工试验方法标准》GB/T50123 - 1999 中剪应力 - 应变曲线中无峰值时, 以 4 mm 对应的剪应力作为抗剪强度这一经验的适用范围加以修正。

## 6 结构特性

广义上讲, 土都具有结构性。从微观上说, 土结构性是指土体颗粒和孔隙的性状和排列形式及颗粒之间的相互作用。土的微结构的认识比较统一, 一般包括 4 个方面<sup>[23]</sup>: 1. 结构单元特征; 2. 颗粒的排列特征; 3. 孔隙性; 4. 结构连接。

土的结构, 习惯上也被用来解释土的天然状态和屈服破坏状态的区别。

絮凝结构和分散结构是粘性土的两大结构类型。植被发育斜坡土体中富含有机质, 这些有机质主要来自于动物、植物和微生物。细小根系及与植被相关的菌丝可网捕土体颗粒形成团聚体, 来自根系、枯枝落叶及真菌的腐殖化有机质是重要的团聚体胶结物<sup>[24]</sup>。此外, 微生物也是相当活跃的。由它们产生的粪便残渣把黏土颗粒由黏粒级转变成粉粒

级团聚体在高有机质土体中广泛存在。

图9以不同尺度展示了头寨植被发育斜坡土体中的团聚体。

利用 Image J 对多组团聚体 SEM 图像做二值化处理,然后计算得到颗粒面积、周长、费雷特直径(Feret)、主定向角等参数,利用这些参数可以计算出以下表征颗粒形态、结构的参量:

#### 1. 颗粒形态<sup>[25-26]</sup>

圆形式:  $C = 4\pi A/P^2$

复杂度:  $D = 21g P/lg A$

式中  $A$  为面积  $P$  为周长,  $C$  值越大说明大孔隙形状越接近圆形,  $C = 1$  表示为圆形;  $D$  代表复杂度,  $D$  值越大,说明扭曲程度越高,形状越复杂。

多组 SEM 照片计算结果取平均值: 圆形式: 65%, 复杂度 42%。

#### 2. 颗粒排列

各向异性率:  $C_a = R - r/R$

式中  $C_a$  表示各向异性率,  $R$  为椭圆形定向分布图的颗粒长轴,  $r$  为短轴。试验区土样的各向异性率平均值为 25.5%。

主定向角: 各颗粒主定向角在  $0^\circ \sim 360^\circ$  分布, 没有明显定向性。

一般地, 随颗粒定向度的增大压缩系数减小, 也就是说, 土体的排列方向越混乱, 在低压条件下的压缩性越低。土体在上覆荷载的作用下, 颗粒排列方向混乱的土体在其颗粒定向过程中将消耗一部分能量用以产生颗粒转动, 相对于定向程度好的土体, 其用于产生垂向位移的应力被相对降低, 所以在低压条件下这种土体表现出较高的抗压性, 这种类似“支架”的作用。

头寨土体结构屈服压力不明显, 说明“支架”结构作用并未体现。

## 7 讨 论

头寨土没有明显的结构屈服强度  $e-p$  曲线不适用双曲线模型, 也没有“倒大”的现象, 具有极小的压缩模量并且随深度增加递增, 诸多结构性软土的共同特性在此均未体现, 可见, 头寨植被发育斜坡土极为特殊。

头寨软粘性土以团粒结构为主, 图8展示出团聚体的微观结构, 显然, 团粒间的空隙具有较高的连通性, 这意味着土体结构骨架松散程度较大, 并且有年最低含水率  $>100\%$ 、平均  $>150\%$  的高含水率, 这样, 在低荷载作用下, 孔隙水压力也会显著影响到土体压缩特性, 使得土体在压力作用下更容易发生变形破坏, 相比之下团粒的“支架”作用微乎其微, 因而结构屈服强度不会明显的体现在  $e-\lg p$  曲线上。

随着压缩量的增大, 孔隙超静水压力也相应增加, 超孔隙水压力一方面增强了土体的抗压强度, 另一方面也使自身的渗透水力梯度加大。于是, 孔隙水压力足够大时, 便会冲破孔壁的阻碍, 使孔隙间过水断面扩展, 一些原来孤立的孔隙也相继连通, 使得土体在外界压力作用下更容易发生变形破坏<sup>[27]</sup>。观察  $e-p$  曲线的实测和模拟对比如图5, 实测曲线趋势在 800 kPa 之后依然是陡降的, 而采用双曲线模型拟合的结果趋于平缓, 这就是双曲线模型不适用植被发育斜坡土体的原因。

一般地, 软土压缩试验初始的小荷载阶段, 压缩变形以土颗粒扰曲、松散的软土骨架产生弹性压缩为主, 伴之以少量孔隙水挤出,  $e-p$  曲线很平缓, 时常出现“倒大”。随着试验荷载的增大, 联系很微弱的软土絮凝-分散结构受破坏, 粘土颗粒发生相对位移, 伴之粒间水体大量挤出, 此时, 曲线具有规则

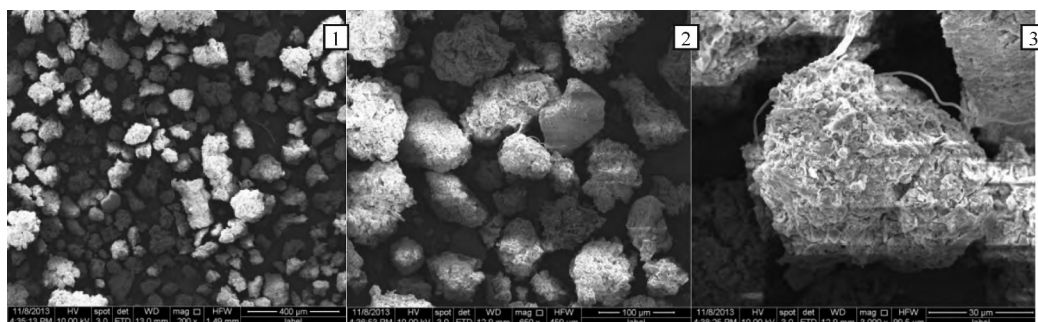


图9 头寨土中团聚体不同尺度的 SEM 照片

Fig. 9 Different dimension SEM photos of Touzhai soil's Aggregates

的递降特征,此段斜率大于前段,出现“倒大”现象。

头寨植被发育斜坡土体以团粒结构为主,这种团粒结构在高含水率的土体中抗压作用极其微弱,孔隙水压力自始至终都在发挥双重作用,即增大抗压性能的同时也在促进空隙之间的连通,这两方面同时影响着  $e-p$  曲线的走势,曲线具有规则的递降特征,而没有“倒大”现象。

## 8 结 论

1. 头寨植被发育斜坡土体具有高含水率、大孔隙比、富含有机质、低密度等特性,比形成于湖泊、河流及三角洲等沉积环境的软土更为特殊。

2. 头寨植被发育斜坡土为具有团粒结构的软粘性土。利用  $I_L$  不能对土的状态做出准确描述,建议以现场勘察资料为准。

3. 与不同相的软土压缩性不同,头寨土  $e-\lg p$  曲线上没有明显的结构屈服强度,  $e-p$  曲线不适用双曲线模型,也没有“倒大”现象。

4. 头寨土体团粒的圆形度平均 65%、复杂度平均 42%、各向异性率平均 25.5%,并且没有明显定向性,具有很好的“支架”结构,但其强度微弱。

5. 头寨土压缩模量极小,且有随深度增加(有机质减少)而增大的规律。

6. 头寨土剪应力-剪切位移曲线普遍无峰值。这应属于土样应变硬化的情况,此外,年平均 > 150% 的超高含水率,使得土体具有极强的延性和变形性能。

7. 年最低 > 100%、平均 > 150% 的高含水率以及团粒结构的特点,决定了头寨土压缩过程中孔隙水压力自始至终起到双重作用,即增大抗压性能的同时也使得土中孔隙连通性增大,在更大荷载作用下更容易压缩变形。

8. 建议将植被发育斜坡土作为一种特殊土对待,力争完善行业规范及国家标准。

## 参考文献(References)

- [1] Zhang Chenghou. Geotechnical characteristics of two structural clay [J]. Hydro-Science and Engineering, 1983, 4: 65-71 [张诚厚. 两种结构性粘土的土工特性[J]. 水利水运工程学报, 1983, 4: 65-71]
- [2] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378
- [3] Shen Zhujiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,

- 20(1): 100-111 [沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100-111]
- [4] Cotecchia F, Chandler R J. A general framework for the mechanical behaviour of clays [J]. Geotechnique, 2000, 50(4): 431-447
- [5] Li Shenglin, Wang Zhenghong. Distribution of Chinese fine-grained soil in a plastic figure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(3): 84-89 [李生林, 王正宏. 我国细粒土在塑性图上的分布特征[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(3): 84-89]
- [6] Xiao Jianhua, Feng Mingzhang. On the division standards for natural states of soft soils [J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(1): 47-52 [肖建华, 冯铭璋. 关于软土状态确定标准的讨论[J]. 工程地质学报, 1997, 5(1): 47-52]
- [7] Nagaraj T S, Murthy B R S, Vatsala A, et al. Analysis of compressibility of sensitive soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(1): 105-118
- [8] Tsuchida T. A new concept of  $e-\lg p$  relationship for clays [G] // Proceedings of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Bangkok: Balkema A A, 1991: 87-90
- [9] Hong Z, Shens, Deng Y, et al. Loss of soil structure for natural sedimentary clays [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2007, 160(3): 153-159
- [10] Hong Z, Liu S, Liu Z. A note on soil structure resistance of natural marine deposits [J]. China Ocean Engineering, 2004, 18(2): 321-326
- [11] Shen Zhujiang. Mathematical model of soil structural - 21 century core issue of soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97 [沈珠江. 土体结构性的数学模型 - 21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97]
- [12] Shen Zhujiang. Amasong model for structured clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 1-4 [沈珠江. 结构性土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 1-4]
- [13] Hong Zhenshun, Liu Songyu, Yu Xiaojun. On destructure of structured soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 684-687 [洪振舜, 刘松玉, 于小军. 关于结构土屈服破坏的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 684-687]
- [14] Xu Jinming, Tang Yongjing. Several promotions on layerwise summation method to calculate foundation settlements [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 518-521 [徐金明, 汤永净. 分层总和法计算沉降的几点改进[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 518-521]
- [15] Liu Baojian, Zhang Junli. Application and analysing method for soil compression test [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 37-41 [刘保健, 张军丽. 土工压缩试验成果分析方法与应用[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 37-41]
- [16] Peng Changxue, Yang Guanghua. A simplified method for determining  $e-p$  curve of soft soil and its application to analyzing nonlinear settlement of foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1706-1710 [彭长学, 杨光华. 软土  $e-p$  曲线确定的简化方法及在非线性沉降计算中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1706-1710]



- [17] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response cohesive soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation ,ASCE ,1963 ,89 ( 1) : 115 – 143
- [18] Feng Mingzhang. Compression curve characteristics of soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1992 ,14( 5) : 95 – 100 [冯铭璋. 软土压缩曲线特征 [J]. 岩土工程学报 ,1992 ,14( 5) : 95 – 100]
- [19] Gao Dazhao. Discussion on compression modulus formula which is in the “Standard for Soil Test Method” [J]. Ground Improvement ,2000 ,11( 3) : 104 – 105 [高大钊. 关于《土工试验方法标准》中压缩模量公式的讨论 [J]. 地基处理 ,2000 ,11( 3) : 104 – 105]
- [20] Qin Zhenlin. To “Earthwork Testing Method Standard” Solidifying Experiment Compression Module Formula Discussion [J]. Urban-Geotechnical Investigation & Surveying ,2010 ,3: 174 – 176 [覃震林. 对《土工试验方法标准》固结试验压缩模量公式的探讨 [J]. 城市勘测 ,2010 ,3: 174 – 176]
- [21] Xu Shuren. Calculated on the compression modulus [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests ,1996 ,20( 3) : 48 – 49 [徐树人. 关于压缩模量的计算公式 [J]. 大坝观测与土工测试 ,1996 ,20( 3) : 48 – 49]
- [22] An Min. Two common errors in consolidation test [J]. Exchange of Jianchang Science & Technology ,1999 ,1: 12 – 15 [安民. 固结试验中常见的两种错误 [J]. 建厂科技交流 ,1999 ,1: 12 – 15]
- [23] Hu Ruilin et al. Study on clay microstructure quantitativemodel and other engineering geological characteristics [M]. Beijing: Geological Publishing House ,1995 [胡瑞林. 等. 粘性土微结构定量模型及其它工程地质特征研究 [M]. 北京: 地质出版社 ,1995.]
- [24] Xu Zemin. Vegetation and macropores in vadose zone of hill slopes [J]. Earth Science Frontiers ,2007 ,14( 6) : 134 – 142 [徐则民. 植被与斜坡非饱和带大空隙 [J]. 地学前缘 ,2007 ,14( 6) : 134 – 142]
- [25] Li Decheng ,Veld e B ,Zhang Taolin. Quantitative estimation of pore variability and complexity in soils by digital image method [J]. Acta Pedologica Sinica ,2003 ,40( 5) : 678 – 682 [李德成 ,Velde B ,张桃林. 利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度 [J]. 土壤学报 ,2003 ,40( 5) : 678 – 682]
- [26] Perfect E ,Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. Soil and Tillage Research ,1995 ,36( 1 – 2) : 1 – 20
- [27] Zhou Yuquan ,Hong Baoning. Experimental research on microstructure changes of clayey soil in process of compression [J]. Rock and Soil Mechanics ,2005( S1) : 82 – 86 [周宇泉 ,洪宝宁. 粘性土压缩过程中的微细结构变化试验研究 [J]. 岩土力学 ,2005( S1) : 82 – 86]

## Physical and Mechanical Properties of Well Vegetated Slope Soils

ZHANG Lei<sup>1</sup> , XU Zemin<sup>2</sup> , ZHANG Luyue<sup>2</sup> , ZHANG Yanting<sup>2</sup> , HOU Ruji<sup>2</sup>

( 1. Department of Earth Science , Kunming University of Science and Technology , Kunming 650093 , China;

2. Department of Civil Engineering , Kunming University of Science and Technology , Kunming 650500 , China)

**Abstract:** On a well vegetated Slope of Touzhai in Zhuotong of Yunnan ,China ,the basic physical characteristics of the soil are high moisture content ,large porosity ,rich organic matters , which is similarly to natural soft clays , but the compression characteristics is different than various phases of soft clays , structural yield strength of the soil from Touzhai is not obvious , the hyperbola model is not suitable for its stress-strain curve , and former coefficient of compressibility can't be less than the succeeding , its compressibility modulus is minimal and increases with the increasing of depth. There is no peak on the curve of shear stress-shear displacement of Touzhai soils , the situation belongs to soil samples' strain hardening , Ultra-high moisture content makes the soils have a very strong ductile and deformation properties. Through analyzing SEM photos by ImageJ , it is shown that the circularity of soil aggregate is 65% , the complexity is 42% , the degrees of anisotropy is 25% , the main orientation angle is 0 ~ 360° , it has a good “skeleton” structure , but the strength of soil “skeleton” is not borne out. Annual minimum moisture content is greater than 100% , mean annual moisture content is greater than 150% , the high moisture content and moisture content properties decide that the porewater pressure plays a dual function role in compression process of soil from Touzhai that the pores connectivity of soil increase with pressure-resistance increasing , it is compression easier with a larger load.

**Key words:** well vegetated slopes; landslide; physical and mechanical properties; organic matter