

# 基于结构性参数的昆明软土压缩特性研究

郭薇, 洪托, 陈刚, 郝少雷

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** 为了明确结构性软土的压缩特性以及土体结构性强弱对工程安全的影响,以昆明市巫家坝片区结构性软土为研究对象,开展了一维固结试验及现场实测,提出了综合考虑含水率和屈服应力的结构性参数 $\gamma$ ,并通过不同土样进行了验证。研究表明,昆明软土具有明显的结构特征,且因其高含水率和较高的有机质含量区别于其他地区土体。随着含水率的增加,软土的结构特性逐渐减弱,更容易发生压缩破坏。并且讨论了先期固结压力随含水率的增加而减小,软土含水率越高,越容易发生变形破坏。研究结果可为预测软土地层中地基的沉降提供理论指导。

**关键词:** 结构性参数;先期固结压力;压缩指数;结构性软土;屈服应力

**中图分类号:** TU43;TU447;P642 **文献标识码:** A

## STUDY ON COMPRESSION CHARACTERISTICS OF KUNMING SOFT SOIL BASED ON STRUCTURAL PARAMETERS

GUO Wei, HONG Tuo, CHEN Gang, HAO Shao-lei

(School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** In order to clarify the compression characteristics of structural soft soil and the influence of structural strength of soil on engineering safety. Taking the structural soft soil in Wujiaaba area of Kunming City as the research object, the one-dimensional consolidation test and field measurement were carried out, and the structural parameter  $\gamma$  considering the moisture content and yield stress was proposed, which was verified by different soil samples. The results show that soft soil in Kunming has obvious structural characteristics and is different from soil in other areas because of its high moisture content and high organic matter content. With the increase of moisture content, the structural characteristics of soft soil gradually weaken and compression failure is more likely to occur. It is also discussed that the early consolidation pressure decreases with the increase of moisture content, and the higher the moisture content of soft soil, the easier the deformation and failure. The results can provide theoretical guidance for predicting the settlement of the foundation in the soft soil layer.

**Key words:** structural parameters; pre-consolidation pressure; compression index; structural soft soil; yield stress

收稿日期: 2023-09-30 改回日期: 2023-11-28

基金项目: 云南省重点研发计划(社会发展专项);云南重大地震灾害及其灾害链综合风险评估技术与应用(202203AC100003)

## 1 引言

近年来,我国城市发展速度日新月异,大中型城市不断向外扩张,用地紧张及城市规划不合理的问题日益严重,逐渐成为制约城市发展的主要问题。在城市建设的进程中,对建筑物的安全稳定及正常使用等都有相关规范的严格要求,但建造在结构性软土地层中的房屋、桥梁、隧道等构筑物都会发生严重的沉降变形,甚至造成重大事故。例如 2018 年发生在深圳市西北部的深基坑工程塌陷事故,是由于场地内存在淤泥质黏土层时,未采用最不利地质情况进行设计,加之降雨量大,导致了基坑坍塌;广州市南沙区某宿舍楼管桩承台开挖时因开挖区内存在淤泥质软土,导致预应力管桩抗剪强度较小,最终桩身上部折断,造成事故。

在我国沿海、内河两岸及大面积湖泊等区域广泛分布着海相、河相及湖相沉积层软粘土。从物理性质来看,其主要特征有液限高、含水率高及孔隙比较大;从力学性质来看,软粘土主要具有强度低、压缩性高和灵敏度高等特点,对工程建设十分不利。因地域差异、构造成因等,沿海及内陆地区的软粘土性质也有较大差异。其中,上海<sup>[1]</sup>作为典型的河口三角洲相冲积土,浅部软土以淤泥质土、粉土和黏土为主,土层内有机质含量低,孔隙面积较小且分布相对平均,应力应变关系相对较平缓。而海口地区作为典型的海相沉积环境,软土的物理力学和物理化学性质等与内陆性土也有诸多差异。此外,武汉地区<sup>[2]</sup>属于长江冲积河漫滩相沉积环境,沉积物以化学风化产物为主,属高含水率、高孔隙比和高黏粒含量的饱和软土。

相较于上述地区,处于高原山间盆地的昆明,属湖相沉积软土且赋存多层泥炭类土,有机质含量可高达 60%,含水量最大可达 299%,孔隙比可达 7<sup>[3]</sup>。其中滇池区域泥炭类土体平面分布最为不均匀,竖向环境复杂多变,通常十多米深的软土范围,可划分 5~6 个土层,均匀性和透水性差,地基沉降持续时间较长,经过复杂的物理化学作用后具有一定的结构性。土体的结构性是指土体在形成过程中受到环境及时间的影响形成的组构及土颗粒间的胶结作用<sup>[4-5]</sup>。已有的研究<sup>[5-7]</sup>证实软土的结构性对其力学性质影响显著,因此研究软土的结构性强弱对于昆明地区的工程建设具有重要意义。

结构性软土的研究可以追溯到 20 世纪,1936 年,Casagrande<sup>[8]</sup>通过  $e\text{-log } p$  曲线的形式呈现软土

固结试验的加压及卸荷的结果,发现先期固结压力越大,卸荷后的回弹曲线斜率越陡,并根据这一特征得出了先期固结压力的计算方法。李涛<sup>[9]</sup>等通过对扰动土样的研究,确立了土体的先期固结压力并建立相关数学公式,但该公式仅适用于非结构性土。Leroueil, S.<sup>[10]</sup>通过大量的室内试验发现,尽管引起结构性的因素有所不同,但对土体力学性质的影响十分相似,表现为类似超固结土的屈服硬化。因此,建议采用一个统一的框架对沉积土考虑应力历史的屈服概念,Leroueil, S. 提出了“结构性”一词来描述这种现象。王志良<sup>[11]</sup>等分析了昆明某隧道泥炭质土地层中的超孔压消散及隧道沉降规律,发现泥炭质土流变性显著,对工程有极大影响。

目前针对结构性软土的研究多为固体,但含水率及振动等条件的变化也会改变软土的力学性质,甚至在某些情况下使其表现出流动特性<sup>[12-14]</sup>。从机理的角度分析,各地区的结构性土存在很大差异,使得土体的力学性质也有不同。同一地区结构性软土在含水率不同时力学特性差异较大。结构性软土存在结构屈服应力,根据还原后的压缩曲线能得到土样的先期固结压力,土体先期固结压力与含水率有负相关性,因此针对高含水率的结构性软土仍需深入研究。本文以昆明巫家坝地区软土为研究对象,通过一维固结试验、现场实测数据和数学计算分析等方法,引入结构性参数  $\beta$  的概念,从多角度分析了该地区不同含水率软土结构性强弱及先期固结压力的规律,为类似工程提供了参考。

## 2 研究区概况

昆明地处滇中高原,是典型的内陆断陷盆地,以湖相沉积、沼泽相沉积和河滩沉积为主,盆地内发育全新世软土,以泥炭质土为主且主要分布在昆明南市区至滇池北部。

与海相沉积(上海软土<sup>[1]</sup>和海口软土)和河漫滩相软土(武汉软土<sup>[2]</sup>)相比(表 1),研究区软土土样作为泥炭质土,其有机质含量高,抗剪强度低,压缩性强,抗震性能较差,极易发生不均匀沉降,且竖向渗透性极差,属于微透水层或不透水层,当受到长期循环荷载的作用时,还会发生缓慢而持久的剪切变形,进而影响土层受力后排水固结,使得地基沉降延续的时间增长。

研究区及土样取样地位于昆明市巫家坝片区白沙河公路西部,整体平坦开阔,结构性软土广泛分布。在昆明区域地质资料及邻近工程地层类比下,

表1 软土的物理性质指标对比

土样	天然含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	土粒密度 $\rho_s/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	有机质含量/ $\%$
昆明软土	95.1	1.38	2.33	92	2.35	116.7	68.6	18.90
上海软土	38.5~55	1.18	2.70	—	1.28	49.65	23.47	<2%
海口软土	72.4	1.54	2.71	99.6	1.97	57.7	23.5	2.5
武汉软土	57.05	1.72	2.68	100	1.39	49.7	28.1	6.5

钻探已揭示的土层按成因可分为10个大层16个亚层,主要以黏土、粉土和泥炭质土为主。泥炭质土存在于已揭露的7个大层中,在研究区内分布广泛,且泥炭质土大多以夹层或透镜体形式存在,工程力学性质相对较差。

### 3 研究区软土压缩变形分析

软土具有孔隙比较大这一特性,是一种欠压密土,在漫长的地质历史中,软土在风力雨雪、盐分及微生物等自然条件影响下,其土颗粒结构和粒间联结不断地被破坏又重组,结构强度缓慢增强并逐渐趋于稳定。为充分探明昆明软土受到扰动后,其屈服应力、不排水抗剪强度、压缩指数和固结系数等力学参数的变化情况,本文通过室内试验得出的  $e-\log p$  曲线、 $e-p$  曲线及压缩指数等数据对软土的结构性进行分析,得出含水率与软土结构性的相关规律。

#### 3.1 结构性软土固结压缩特性研究

通过对研究区结构性软土土样的研究,发现不

同含水率下土层的物理力学参数差异较大。其中泥炭质土层呈黑色,灰黑色,湿,可塑,局部软塑,切面粗糙,无光泽,韧性低,干强度低,土质不均匀,具高压缩性,含水率高达75%~180%,天然孔隙比超过2,且标贯击数均小于6,抗压强度低,但有机质含量约30%,承载力较差,其受到振动后的结构性变化与黏土、粉土等有所区别(表2)。本文仅针对地层内性质较为特殊的泥炭质土土样进行结构性分析。

通过一维固结试验得到的不同含水率土体压缩  $p-s$  曲线及  $e-\log p$  曲线(图1)。可以发现,在压力相同时,含水率为169%的土样形变量接近10 mm。根据  $e-\log p$  曲线(图1b),大孔隙软土的  $e-\log p$  曲线中有明显拐点,符合超固结土的特征。当竖向压力小于该点对应的压力值时,土体以弹性变形为主,压力超过该值,土体不可恢复的塑性变形剧增,强度显著降低且压缩性变大,土体屈服。

从  $e-\log p$  曲线中能看出,含水率越高的曲线拐点出现得越早,含水率169%土样的拐点压力值约

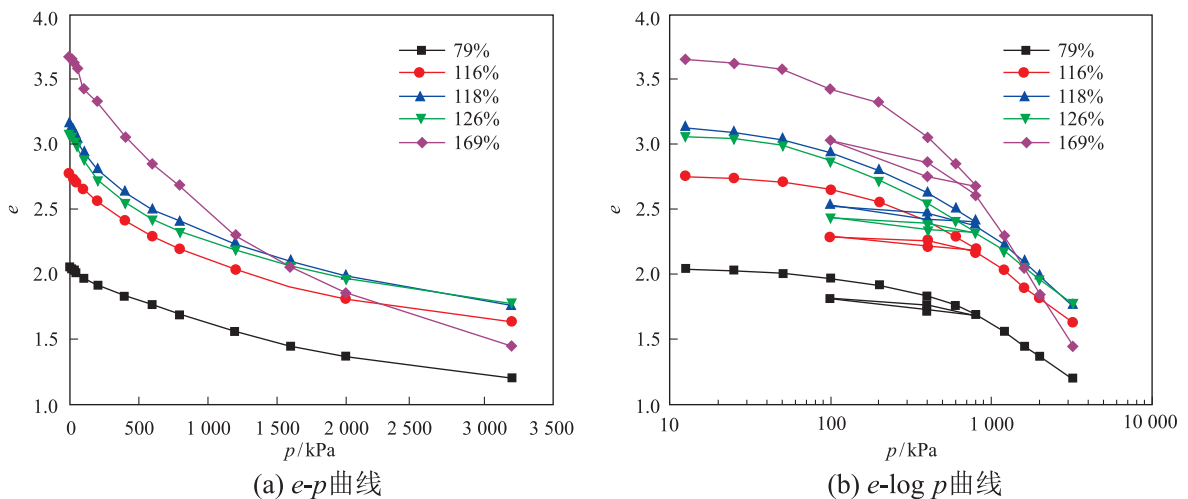


图1 原状软土压缩曲线

为200 kPa,而79%含水率土样的拐点压力值则高达880 kPa,表明高含水率软土结构破坏达到屈服所受到的荷载要小于低含水率软土,且这种破坏土体结构使其屈服的力与含水率呈负相关性。荷载超过屈服应力后,不同含水率土样的  $e-\log p$  曲线均近似一条直线,直线斜率即为原状土的压缩指数  $C_c$ ,

拐点对应的孔隙比为屈服孔隙比  $e_y$ 。

由图2可知含水率为169%时  $C_c$  值为2.03,79%含水率时仅为0.831,这使得软土结构屈服所对应的压力值减小。显然软土含水率越高,其结构屈服的应力值越小,在受到较小荷载时就会发生压缩变形。

表 2 土层物理力学参数

土层	质量密度 $\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>	泊松比 $e$	弹性模量 $E_s$ /MPa	粘聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ /°
① <sub>1</sub> 杂填土	1.8	0.35	15.00	8.0	15.0
① <sub>2</sub> 素填土	1.99	0.32	21.18	38.3	12.2
② 粉质黏土	1.97	0.31	21.96	40.8	9.7
③ <sub>1</sub> 有机质黏土	1.72	0.31	12.36	18.5	3.7
③ <sub>2</sub> 黏土	1.86	0.31	13.74	25.2	3.8
④ <sub>1</sub> 黏土	1.95	0.31	21.18	34.2	8.1
④ <sub>2</sub> 粉土	2.02	0.32	26.94	25.6	14.1
④ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.64	0.42	15.66	37.4	9.7
⑤ <sub>1</sub> 黏土	1.90	0.31	18.51	26.7	6.9
⑤ <sub>2</sub> 粉土	2.02	0.32	22.71	27.3	13.6
⑤ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.38	0.42	12.00	25.1	5.1
⑥ <sub>1</sub> 黏土	1.80	0.31	16.83	34.4	8.5
⑥ <sub>2</sub> 粉土	1.96	0.32	20.52	23.6	11.5
⑥ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.41	0.42	13.77	28.3	5.6
⑦ <sub>1</sub> 黏土	1.84	0.31	19.38	39.3	7.2
⑦ <sub>2</sub> 粉土	1.94	0.32	32.82	27.2	11.8
⑦ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.46	0.42	26.19	25.4	5.9
⑧ <sub>1</sub> 黏土	1.84	0.31	22.71	48.5	8.6
⑧ <sub>2</sub> 粉土	1.94	0.32	33.36	26.7	11.4
⑧ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.63	0.42	24.06	25.9	6.9
⑨ <sub>1</sub> 黏土	1.81	0.31	21.54	40.1	8.1
⑨ <sub>2</sub> 粉土	1.96	0.32	26.43	24.5	11.6
⑨ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.38	0.42	19.02	28.8	6.9
⑩ <sub>1</sub> 黏土	1.83	0.31	21.60	38.7	8.0
⑩ <sub>2</sub> 粉土	1.91	0.32	20.43	25.8	10.4
⑩ <sub>3</sub> 泥炭质土	1.47	0.42	19.80	25.8	6.1

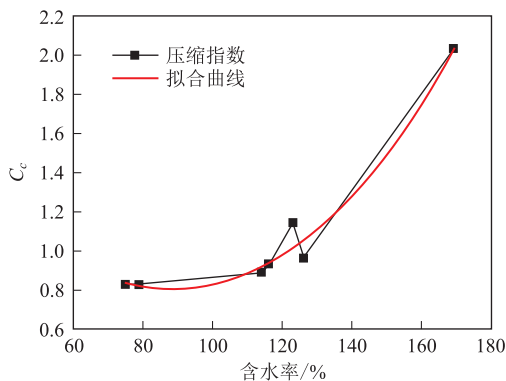


图 2 软土压缩指数与含水率拟合曲线

### 3.2 结构性参数

根据一维压缩  $e-\log p$  曲线所示, Liu 和 Carter 等<sup>[15-18]</sup>认为压缩曲线上特定竖向压力值对应的孔隙比差可以反映原状土与受扰动后土体的差别。谢定义及陈存礼<sup>[19-20]</sup>等分别验证了在压缩试验中竖向压力、竖向变形与孔隙比之间存在一定的对应关系,且提出了以孔隙比形式表达的结构性参数  $m_c$ 。然而,孔隙比作为可以反映土体强弱的指标之一,无法体现屈服应力对结构性强弱的影响,现有的研究成果尚未出现同时涉及这两个因素,但屈服应力作为软土是否发生结构性破坏的重要因素,其研究意义非

常重要。

为综合考虑孔隙比及屈服应力的影响,本文提出结构性指数  $W$ ,该指标为  $\Delta e_1$  在区间  $[0, \log p_y]$  上的积分值,即某土样  $e-\log p$  曲线与理想重塑曲线所围成的面积:

$$W = \int_0^{P_y} \Delta e_0 dp \quad (1)$$

同时,针对结构性土,还原后压缩曲线与理想重塑曲线围成的面积称为固有结构性指数  $W^*$ ,即  $\Delta e_2$  在区间  $[0, \log p_y]$  上的积分值:

$$W^* = \int_0^{P_y} \Delta e_1 dp \quad (2)$$

通过两个指数可以得到结构性参数  $\beta$ ,如式(1),即图 3 所示:

$$\beta = \frac{W}{W^*} \quad (3)$$

本文提出的结构性参数概念可以通过一维固结试验所示曲线直观地反映出土体具有的结构性对于其压缩特性的影响,且同时考虑了孔隙比及屈服应力两种表征软土特性的因素。结构性参数完整的反映了软土受力压缩过程中的结构性的变化, $\beta$  值越大,表明软土在固结的过程中被压缩的量越小,土颗粒间的胶结能力越强,软土的可稳性越强可变性越小,其结构性越强。

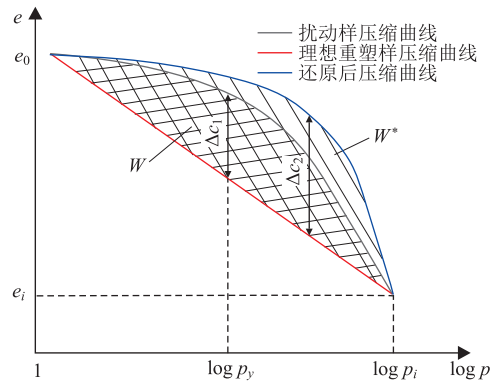


图 3 一维压缩  $e-\log p$  曲线中结构性指数与结构性参数示意图

## 4 结构屈服应力的求解

基于目前取样方式及外界因素的影响,现场试验中所取得的土样都会受到一定程度的扰动,因此严格来讲,使用现场试验数据对结构性土进行分析的结果并不能完全反映实际情况。李涛<sup>[9]</sup>等建立了原状样的数学模型,但针对结构性土的分析,该模型仍存在不足。沈珠江<sup>[21]</sup>建议将结构性较强土体的

超固结比的概念改为结构应力比  $\eta$ , 将规范计算出的先期固结压力称为结构屈服应力  $\sigma_k$ 。王国欣<sup>[22]</sup>在此基础上改进了数学模型, 使用结构屈服压力代替原模型中的上覆压力  $P_0$ , 根据此公式可计算出原状土的压缩曲线关系。公式如下:

$$e = e_0 - C_r (\lg P_L)^{1-A} (\lg p)^A \quad (4)$$

$$A = 1 + \frac{\lg(C_s/C_r)}{\lg(\lg \sigma_k / \lg p)} \quad (5)$$

式中,  $e_1$  为压力 1 kPa 时对应的孔隙比, 可用初始孔隙比  $e_0$  代替;  $C_r$  为理想重塑样的压缩指数, 即理想重塑样压缩曲线的斜率;  $C_s$  为重塑样回弹指数, 重塑样回弹滞回圈端点连线的斜率;  $\sigma_k$  为原状样的结构屈服压力;  $P_L$  为重塑样与原状样压缩曲线交点所对应的压力值, 根据文献资料取压缩曲线在  $0.59 e_0$  对应的压力值;  $A$  为还原系数, 它反映了还原后压缩曲线的特征。

根据式(4)及式(5), 选取含水率为 169% 的土样数据进行计算, 可求出理想重塑土的压缩指数  $C_r = 0.108$ , 回弹指数  $C_s = 0.052$ , 交点处对应的压力  $P_L = 1355$  kPa。初始孔隙比  $e_0 = 3.658$ ,  $\sigma_k = 336.6$  kPa, 计算出还原后的压缩曲线, 并得出计算后的方程  $e = 3.658 - 0.0028(\lg p)^{4.2}$ , 将所得公式做出图形(图 4)。用 Casagrande 法计算还原后的压缩曲线, 得出先期固结压力值  $P_c = 183.5$  kPa。

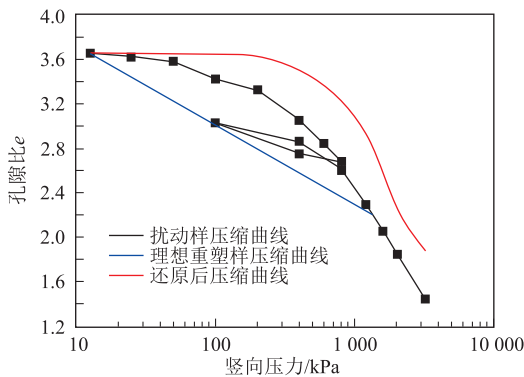


图 4 还原后的压缩曲线

基于式(2)、式(3)及表 3 所示的计算结果, 可以得到不同含水率对应的结构性参数  $\beta$ 。结果表明, 随着含水率从 79% 增加至 169% 时, 归一化后的结构性参数  $\beta$  的值逐渐减小, 这意味着结构性参数与软土含水率有一定的负相关性。结合结构性参数的相关定义可知, 软土含水率越高其屈服应力越小, 高含水率的软土在受到较小荷载时即有可能发生较大的变形。

经过拟合可以得到结构性参数与含水率之间的线性关系如图 5 所示, 其公式为:

表 3 不同含水率软土基本参数

土样	含水率/%	$e$	$\sigma_k$ /kPa	$C_c$	$\beta$	$P_c$ /kPa
1	79	2.054	421.7	0.831	0.84	1096.7
2	116	2.776	265.3	0.927	0.57	886.1
3	118	3.15	292.5	1.139	0.53	653.3
4	126	3.083	192.5	0.967	0.45	482.6
5	169	3.667	336.6	2.03	0.42	183.5

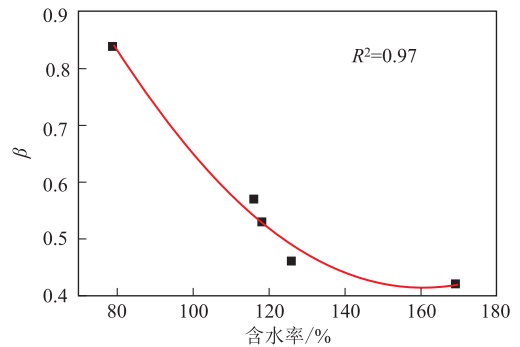


图 5 结构性参数与含水率线性关系

$$\beta = 2.09 - 0.021e + 6.52E^{-5}e^2 \quad (R^2 = 0.97) \quad (6)$$

软土作为具有结构性的土体, 它的力学变形与结构屈服破坏有很大的关联性。软土的结构性参数随含水率的增加呈指数形式降低, 软土含水率越高, 内部水分含量越高, 土颗粒之间固化联结作用变差, 结构性趋于减弱。

计算出的  $P_c$  值可以更为直观地了解含水率与屈服应力的关系, 其线性关系如图 6 所示, 拟合公式为:

$$P_c = 2021.8 - 11.1e - 0.008e^2 + 5.3E^{-5}e^3 \quad (R^2 = 0.96) \quad (7)$$

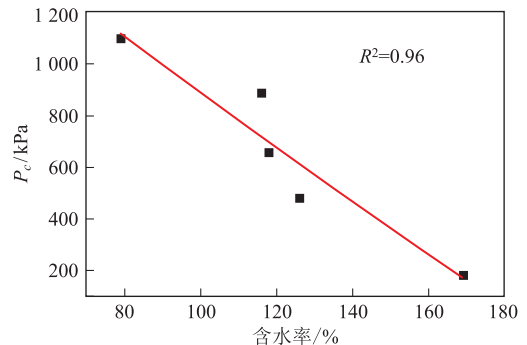


图 6 含水率与屈服应力线性关系

引入结构性参数及使用  $P_c$  值进行分析均可得到软土屈服应力随含水率的增加而减小的结论。结构性参数  $\beta$  直接反映了软土含水率及竖向压力之间的关系, 由前文可知含水率越高时  $\beta$  值越小, 在受到相同荷载时更易发生破坏。利用该公式及一维固结试验数据, 可计算任意状态下结构性软土压缩应力

路径以孔隙比形式表达的结构性参数大小。在相关工程设计时结合该地区土层含水率及竖向压力可计算出土体结构性强弱,并预测土体压缩强度。因此,在高含水率地区建设房屋或隧道等工程时应额外注意支护方式的设计与选用,防止出现安全事故。

## 5 工程案例

昆明市作为云南省的省会,其发展速度日新月异。随着城市扩张与人口增加,用地面积也在不断扩大。滇池附近风景优美,依山傍水,已经成为了昆明城市开发的重点区域。然而针对滇池附近区域软土地层的研究未能与大规模的城市建设相匹配,许多建设项目不得不以松软的泥炭质土作为地基,导致建成后部分建筑物出现开裂或不均匀沉降等安全问题。昆明地区的泥炭质土作为结构性软土,建造在其上的房屋、桥梁、隧道等构筑物都可能发生严重的沉降变形,这对人员安全及经济发展都十分不利。

位于滇池路上的天泽园小区,建设有26幢楼房,其中小区内7幢及14幢出现了明显的地基沉降以及房屋开裂的现象。针对该房屋的地质勘测监控了地表变化,在每月两次的监测中显示14幢房屋连续两月地基沉降大于2 mm,以及严重威胁到房屋的安全问题。

2019年8月,昆明市白龙路段人行道附近出现地面凹陷,临近的兴昭大酒店发生墙体开裂,酒店出现严重破坏,事故原因为临近某地铁站C出入口基坑开挖,导致下覆的泥炭质土在受到震动后强度大幅度降低,土体产生蠕变后出现了不均匀沉降,周边土体水土流失导致路面沉降及房屋破坏,加之突降暴雨,基坑支护结构失稳引发了此次事故<sup>[23]</sup>。

云南省农牧渔业厅位于昆明市滇池附近区域,在13层牧工商大楼拟建之初,采取了振冲碎石桩法处理昆明软土地基,但该方法适用范围有限,地基处理规范要求被处理土层的不排水抗剪强度不小于20 kPa,滇池区域泥炭质土不排水抗剪强度远低于20 kPa,未达到施工要求,因此在施工完成后一年时间内平均沉降已达到256 mm,沉降速率0.611 mm/d,所幸沉降平稳,房屋主体未见明显倾斜或开裂,但昆明软土地层引起的严重沉降问题仍需重视<sup>[24]</sup>。

由此可见,软土地层尤其是昆明滇池区域的泥炭质土作为不良地基,极易诱发各种事故,造成人员伤亡或财产损失,因此针对该类型结构性软土的研究意义重大,在设计施工之初对其结构性进行评价,不仅会使施工过程更加经济高效,也会降低工后沉

降带来的风险。

## 6 结论

本文通过对昆明滇池区域高含水率软土进行分析,得出结论如下:

(1) 昆明软土特性有别于其他地区软土,其有机质含量达30%,含水率在75%至180%范围内,孔隙比均超过2,是具有高结构性的软土。

(2) 通过对研究区结构性软土拟合得出公式  $y = 3.42 - 0.07x + 9.31E^{-4}x^2$  ( $R^2 = 0.98$ ),发现软土压缩指数随含水率的增高呈整体增大趋势,而压缩指数的增加使得软土结构屈服所对应的压力值减小,因此软土的含水率越高,发生破坏时对应的屈服应力值越小。当软土含水率为126%时,其屈服应力为192.5 kPa。

(3) 研究区结构性参数 $\beta$ 可以综合考虑孔隙比和屈服应力的影响。根据一维固结试验及计算出的先期固结压力值可知,研究区结构性软土的含水率从79%增加至169%时,结构性参数由0.84线性衰减至0.42,即软土含水率越高,其结构性越差,受到较小荷载时即有可能发生较大的变形。

## 参考文献

- [1] 李越. 上海软土宏观力学特性与微观特征试验研究[D]. 上海交通大学, 2018.
- [2] 吴雪婷, 陈斌, 项伟, 等. 武汉河漫滩相软土工程特性试验及对比研究[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(8): 30-35.
- [3] 刘敏. 昆明泥炭及泥炭质软土的工程特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017, (9): 207-208+21-22.
- [4] J B BURLAND. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [5] Blackburn J T. Automated remote sensing and three dimensional analysis of internally braced excavations [D]. Northwestern University, Evanston, 2005.
- [6] Liu MD, Carter JP. Virgin compression of structured soils[J]. Géotechnique, 1999, 49(1): 43-57.
- [7] Gutierrez M, Nygard R, Hoeg K, et al. Normalized undrained shear strength of clayshales[J]. Engineering Geology, 2008, 99(1): 31-39.
- [8] Casagrande A. The determination of the preconsolidation load and its practical significance[J]. Proc. of First ICMFE, 1936, (3): 60-64.
- [9] 李涛, 钱寿易. 土样扰动影响的评价及其先期固结压力的确定[J]. 岩土工程学报, 1987, (5): 21-30.
- [10] Leroueil, S. & Vaughan, P R. The general and congruent effects of structure in natural64[J]. Soils and weak rocks. Geotechnique, 1990, 40(3): 467-488.
- [11] 王志良, 瞿嘉安, 申林方, 等. 泥炭质土层盾构施工扰动引起隧

- 道长期沉降的研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1416-1424.
- [12] Cording EJ, Hansmire WH. Displacements around soft ground tunnels [A]. Proceedings of the 5<sup>th</sup>.
- [13] Cui Y J, Nguyen X P, Tang A M, et al. . An insight into the unloading/reloading loops on the compression curve of natural stiff clays [J]. Applied Clay Science, 2013, 83-84, 343-348.
- [14] Hajjar M, Nemati Hayati A, Ahmadi M M, et al. . Longitudinal settlement profile in shallow tunnels in drained conditions [J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 15(6).
- [15] Liu MD, Carter JP. Modelling the destructuring of soils during virgin compression [J]. Géotechnique, 2000, 50(4): 479-483.
- [16] Vardanega PJ, Bolton M D. Stiffness of Clays and Silts; Normalizing Shear Modulus and Shear Strain [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1575-1589.
- [17] Tan J, Cui ZD, Yuan L. Study on the long-term settlement of subway tunnel in soft soil area [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(5): 486-492.
- [18] 徐永福. 土体施工扰动特点的研究[C]. 中国土木工程学会第八届土力学与岩土工程学术会议, 南京, 1999: 622-625.
- [19] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, (6): 651-656.
- [20] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, (11): 1891-1896.
- [21] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, (1): 100-111.
- [22] 王国欣, 肖树芳, 周旺高. 原状结构性土先期固结压力及结构强度的确定[J]. 岩土工程学报, 2003, (2): 249-251.
- [23] 刘月华, 阮永芬, 施建伟, 等. 深厚泥炭质土地深基坑工程事故分析[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(3): 33-37.
- [24] 阮永芬, 刘岳东, 王东, 等. 昆明泥炭与泥炭质土对建筑地基的影响[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2003, (3): 121-124.

**作者简介:** 郭薇(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事工程地质及水文地质研究。E-mail: 602735253@qq.com

**通信作者:** 洪托(1970—), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事矿产调查及工程地质研究。E-mail: hongtuo@kust.edu.cn