

超深静力触探试验在昆明巫家坝软土地勘中的应用

丁溪泉¹, 刘海军¹, 郭晓霞², 王 新¹, 刘兴国¹

(1. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 重庆 渝北区 401121;
2. 大连理工大学, 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116000)

[摘 要]昆明巫家坝地处滇池流域, 部分地区其第四系土层厚度超过百米, 含有多层泥炭质土及软弱层, 常规静力触探手段无法满足要求, 严重制约昆明地区建筑基坑与基础设计。为解决这个问题, 通过改进静力触探试验方法, 对场地 90 m 深度内土层进行超深静力触探测试, 结合室内土工实验结果, 对比静探数据与钻孔数据, 结果表明: (1) 静探反映的地层信息与现场钻探获得的土层信息基本一致, 且与周边类似项目数据吻合。通过分析数据发现: (2) 地表 10 m 深度以内的地层, 受以往工程活动影响, 静力触探侧摩阻力较经验值偏大; (3) 深度 90 m 以内地层的侧摩阻力随深度增加而增加; (4) 泥炭质土与粉土常相伴出现, 结合各类土层地质成因分析, 此特征是滇池水位变化引起的。

[关键词]超深静力触探; 侧摩阻力; 泥炭质土; 粉土; 地层划分; 昆明

[中图分类号] TU41; P642.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2022)02-0174-07

1 引言

随着昆明市建设加速推进, 超高层建筑成为城市化的象征。建筑高度的提升、大幅增加的基础设计难度, 为工程勘察提出了新要求。特别是淤泥、泥炭土等软土地场, 桩基埋深达 60~70 m, 常规勘察手段很难满足要求。为解决此问题, 我们以昆明巫家坝超高层项目场地为依托, 改进静力触探试验方法, 完成现场超深静探试验。

针对不同的地质情况存在不同的勘察方法, 如在金矿勘查中使用的充电法(羊文, 2021); 在矿山开发中应用的遥感技术(李思发, 2021); 铁矿勘查中采用的高精度磁法等(黄启霖, 2019)。对于软土地基最为有效的方法就是静力触探法, 静力触探最早起源于荷兰, 随后被各国引进。1964年, 我国成功研制出第一台电测式触探仪(王钟琦, 2000)。静探测试主要用于软土地场, 通过静

压力将标准探头以一定的速率匀速压入土中, 获取贯入阻力数据, 从而进行土层分层、液化判别、强度估算和桩基设计, 具有效率高、速度快、精度高、成本低等特点(王锦艳, 2016; 付超, 2016; 皇富强, 2021)。

静力触探作为软土地场常用勘测手段, 在各地工程实践中取得了丰硕成果。在地铁车站工程勘察中使用静力触探(陈锦, 2021); 应用静力触探对吹填土特性进行分析(刘举, 2012); 采用静力触探推测滑裂面等(詹旺林, 2021)。在超深静力触探方面许多学者也进行了有益探索, 使用深层静力触探估算深长灌注桩单桩承载力, 提出新的修正系数计算公式(高敬, 2016); 引进国外先进静探设备, 使陆地静探测试深度突破 100 m(王波, 2016); 研究了深层静力触探如何预防孔斜与曲线失真以及贯入不深与断杆问题, 并提出灌水辅助测试的新方法(邵水松, 2012)。

我们在前人的探基础上, 采用 XY-150 型钻

[收稿日期] 2021-12-23 [修回日期] 2022-04-05

[作者简介] 丁溪泉(1991—), 男, 硕士, 主要从事岩土力学及应用研究, E-mail: 997945589@qq.com。

[通讯作者] 刘海军, 男, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 硕士生导师, E-mail: 1069059102@qq.com。

机结合 DYLC 大型静力触探设备进行了 86.5 m 孔深原位测试,对比钻探成果、周边测试,结果表明深处地层静探测试数据与地层钻探数据之间表现出高度符合性,具有较大工程实践意义。

2 超深静力触探测试

2.1 地质概况

试验场地位于昆明市官渡区巫家坝商业新中心(CBD)核心地带,处于昆明冲湖积盆地中南部,地貌单元属滇池冲湖积盆地平原地貌。场地原为昆明巫家坝机场停机坪和停车场,地形平坦开阔。

场地地基土层分布特征主要表现为:表层广范分布人工填土层,层表均覆盖厚约 30~70 cm 不等的砂地坪;浅部为冲洪积黏性土;中部为第四系全新统冲湖积具一定的沉积韵律(多呈互层状或夹薄层状);下部为厚度较大的第四系上更新统冲湖积层,具一定的沉积韵律。

2.2 设备选用

本次超深静力触探设备由 DYLC 履带式静力触探车、KE-2103 型静探微机、15 cm² 双桥静力触探探头和 XY-150 型钻机组成。

DYLC 由一台小型柴油机和单联齿轮油泵提供动力,静探额定贯入力为 200 kN,静探起拔力为 240 kN;与静力触探车配套的测试设备为 KE-2103 型静探微机,可用于单、双桥静力触探试验,十字板剪切试验,单、双桥孔压静力触探试验,超孔隙水压消散试验等。



图 1 DYLC 履带式静力触探车

Fig. 1 DYLC crawler static probe vehicle

2.3 数据采集的方法

在静力触探车就位前,平整场地,夯实地表松散土层,选择地锚,保证总反力大于贯入力。贯入工作开始时,由专人控制推进油缸的上升与下降,以(20±5 mm/s)进行匀速贯入。贯入过程中其他人手动松紧卡瓦螺丝、连接探杆配合推进油缸工作确保油缸上下连续不间断,拧紧每根相连接的探杆,防止丝扣的松动,造成脱扣,保证垂直贯入。

深度在 30 m 以内时,采用常规静探方法进行试验,通过 KE-2103 型静探微机记录端阻与侧阻数据。当静探深度超过 30 m 后,钻杆易发生弯曲与孔壁间产生较大阻力,阻碍试验进行,此时需要下套管,在套管的固定及保护条件下进行静探。遇到坚硬地层时将探杆提起,改用 XY-150 型钻机,对原探孔进行扩孔,观察取土器中土样情况并取样分析,当发现钻头穿越坚硬底层后重新进行静探,记录扩孔深度以此修正静探试验曲线。每次遇到坚硬地层时重复扩孔再贯入的操作,直至计划深度。

3 超深静力触探测试结果

现场采用双桥静力触探对 A2XK72、A2XK104、A2XK106 三个桩位进行测试,桩位坐标依次为(X=890 068.77, Y=2 567 226.32; X=890 065.10, Y=2 567 150.55; X=890 107.65, Y=2 567 124.61),静探深度分别为 80.7 m、84.0 m、86.5 m。获得探孔锥尖贯入阻力(q_c)、侧壁摩阻力(f_s)及摩阻比(R_f)三项参数曲线。

3.1 浅层地基静探数据特性

从图 2 可以发现,探头刚进入地层时,侧摩阻力较大,粘土层锥头阻力为 1.31~1.77 MPa,对应的侧摩阻力为 99.26~145.27 kPa,摩阻比为 6.20%~8.21%;静探至 5m 左右深度时侧摩阻力减小,粉土层锥头阻力为 0.57~0.63 MPa,对应的侧摩阻力为 24.56~28.31 kPa,摩阻比为 4.13%~4.49%;静探至 10 m 深度时侧摩阻力回归正常,粉质粘土层锥头阻力为 0.69~1.11 MPa,对应的侧摩阻力为 16.04~26.93 kPa,摩阻比 2.07%~2.43%。

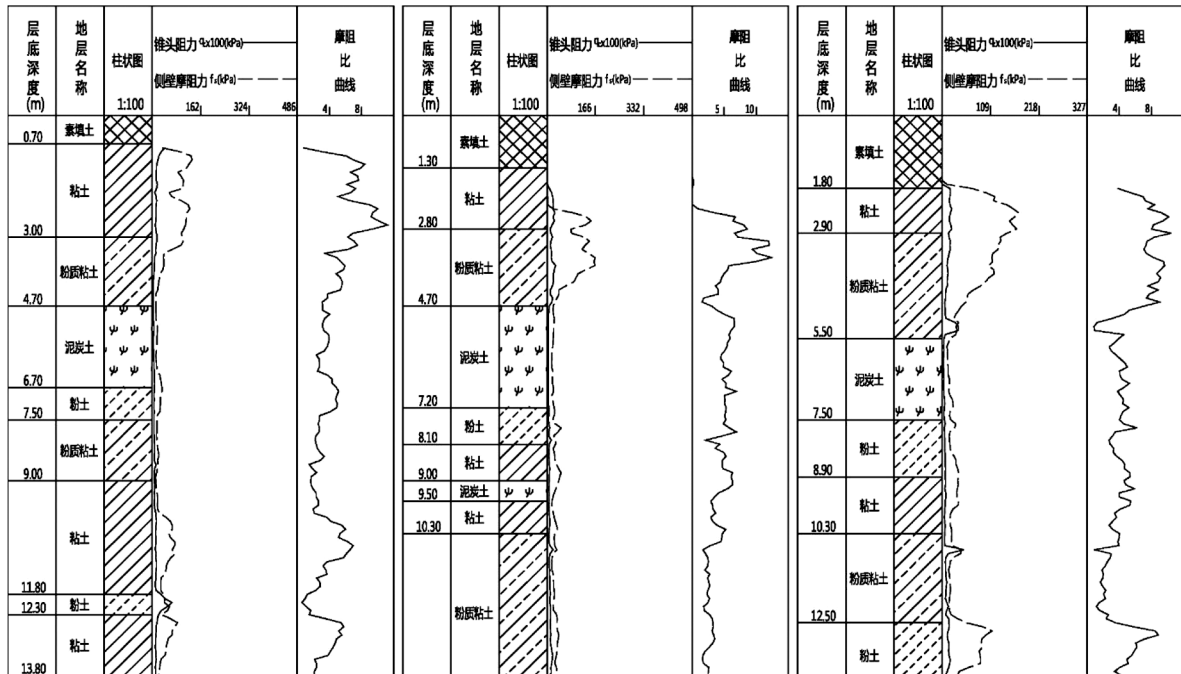


图2 A2XK72号、A2XK104、A2XK106号孔浅层静力触探数据

Fig.2 Shallow static sounding data of drill A2XK72, drill A2XK104 and drill A2XK106

3.2 深层地基静探数据特性

侧摩阻力受深度的影响,且随深度增加而增加。选取粉质粘土作为研究对象,建立探孔中23层粉质粘土中心深度与侧摩阻力关系图,如图3所示。其中最小侧摩阻力为22.6 kPa,对应深度为11.4 m;最大侧摩阻力为95.58 kPa,对应深度为83.55 m。

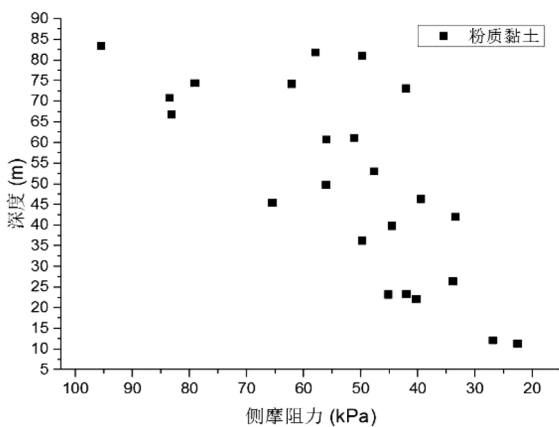


图3 粉质粘土深度与侧摩阻力关系散点图

Fig.3 Scatter diagram of the relationship between silty clay depth and lateral friction

此外为研究摩阻比与深度的关系,建立粉质粘土中心深度与摩阻比关系图,如图4所示。其中最小摩阻比为1.92%,对应深度为42.05 m;最

大摩阻比为3.62%,对应深度为83.55 m。图中数据点离散分布,未显示出线性规律。

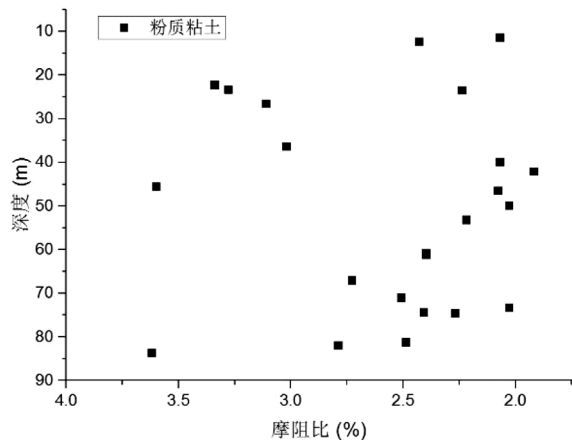


图4 粉质粘土深度与摩阻比关系散点图

Fig.4 Scatter diagram of silty clay depth and friction ratio

3.3 泥炭质土分布特性

泥炭质土土层周围常伴随粉土层,试验用的3处探孔中共有38层泥炭质土,其中有29层与粉土相邻,此外有4层未临近粉土的泥炭质土段曲线可以分为两段,一段性质类似于粘土,端阻qc曲线比较平缓,有缓慢的波形起伏,局部略有突峰,侧阻fs曲线略有突峰,在曲线右侧且距离较大;另一段位于土层末端,似于粉土,端阻qc值较

大,曲线呈短锯齿状,齿峰较缓。泥炭质土土层末端的静探曲线突变是粗颗粒引起,只是粗颗粒层较薄,钻探取芯时和泥炭质土划分在一起,未被独立分层。

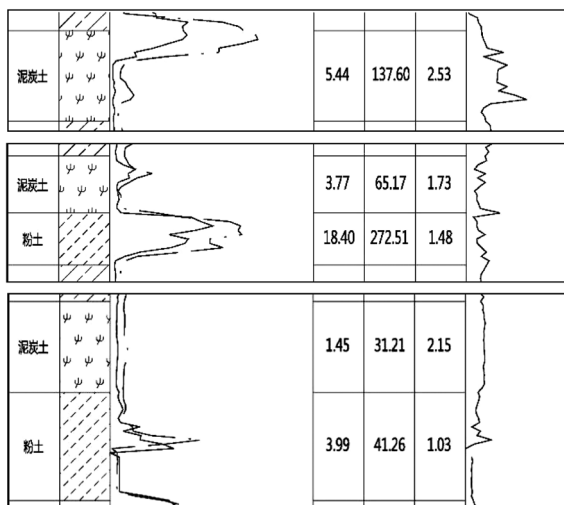


图 5 泥炭质土静力触探曲线及周围土层

Fig. 5 Static contact curve of peat soil and surrounding soil layer

4 超深静力触探测试数据分析

4.1 静力触探数据与钻探数据吻合度分析

选取场地 1 0m 以下粉质粘土作为分析土层,对比静力触探数据与钻探数据粉质粘土厚度及埋深如表 1。

表 1 统计了 3 个钻孔中 23 组粉质黏土的测试结果,在埋深与厚度方面,静力触探数据与钻探数据的最大偏差值均为 1.1 m,对应数据为 A2XK104 号钻孔 62.60~65.80 m 深度处。静力触探与钻探数据整体重合度高,改进后的超深静力触探试验方法未对数据结果造成影响。

4.2 浅层地基侧摩阻力影响因素

结合场地信息,场地地处原巫家坝机场停机坪和停车场地段,表土由巫家坝机场修建时铺设和

表 1 静力触探数据与钻探数据中粉质粘土埋深及深度

Table 1 Buried depth and depth of silty clay in static penetration data and drilling data

钻孔	静力触探地层深度(m)	厚度(m)	钻探地层深度(m)	厚度(m)
A2XK72	14.30~15.60	1.30	14.30~16.20	1.90
A2XK72	17.90~19.40	1.50	18.30~20.30	2.00
A2XK72	22.00~24.90	2.90	22.00~24.60	2.60
A2XK72	29.20~31.30	2.10	29.00~31.50	2.50
A2XK72	44.70~48.00	3.30	44.80~48.00	3.20
A2XK72	51.40~54.70	3.30	51.40~54.80	3.40
A2XK72	74.10~75.80	1.70	73.20~75.80	2.60
A2XK104	10.30~14.00	3.70	10.30~14.20	3.90
A2XK104	22.30~24.70	2.40	21.80~25.10	3.30
A2XK104	38.40~41.00	1.60	38.60~41.20	1.60
A2XK104	44.60~46.90	2.30	44.50~46.50	2.00
A2XK104	50.90~53.30	2.40	50.30~53.00	2.70
A2XK104	60.50~62.00	1.50	60.30~62.00	1.70
A2XK104	62.60~64.70	2.10	62.60~65.80	3.20
A2XK104	71.50~74.90	3.40	71.70~74.70	3.00
A2XK104	80.30~81.70	1.40	80.50~81.80	1.30
A2XK106	11.00~12.30	1.30	10.30~12.50	2.20
A2XK106	13.80~16.70	2.90	14.10~17.80	3.70
A2XK106	21.40~22.60	1.20	21.50~22.90	1.40
A2XK106	41.20~43.10	1.90	40.90~43.20	2.30
A2XK106	60.00~62.20	2.20	59.50~62.10	2.60
A2XK106	73.40~75.50	2.10	73.20~75.40	2.20
A2XK106	79.90~84.60	4.70	79.70~84.10	4.40

填筑,时间超过10年。场地早期建设过程中已经过夯实等相应处理,总体上已有一定的固结强度。这种固结使得土层变得密实,空隙比越小、压缩模量越大,静探探头贯入土体后,土体变形相对困难,法向附加应力大,因此侧摩阻力较大(刘玮,2007)。地表至5 m处受早期机场夯实作用影响最大,因此侧摩阻力偏大;随着深度逐渐接近5 m深度,夯实影响逐渐减小,侧摩阻力不断减小,5~10 m深度,受机场地表夯实影响效果小于上一层。10 m以下的土层不再受土表夯实的影响。

4.3 深层地基侧摩阻力影响因素

昆明巫家坝超深静力触探试验,从同种土的各层之间考虑深度对静力触探侧摩阻力的影响,因粉质粘土层静探数据较稳定且便于识别,取场地中粉质粘土作为代表层,分析不同深度的粉质粘土之间的侧摩阻力随深度变化关系,观察图3可得,侧摩阻力随深度增加而增大且近似成正比,对散点进行线性拟合,如图6所示,拟合公式如下:

$$F_s = k_1 \times h + c_1 \tag{1}$$

其中 $k_1 = 0.59$; $c_1 = 22.87$;

F_s 表示侧摩阻力,单位为 kPa;

k_1 为侧摩阻力随深度的增长系数,单位为 kPa/m;

c_1 表示深度为零时的侧摩阻力,单位为 kPa。

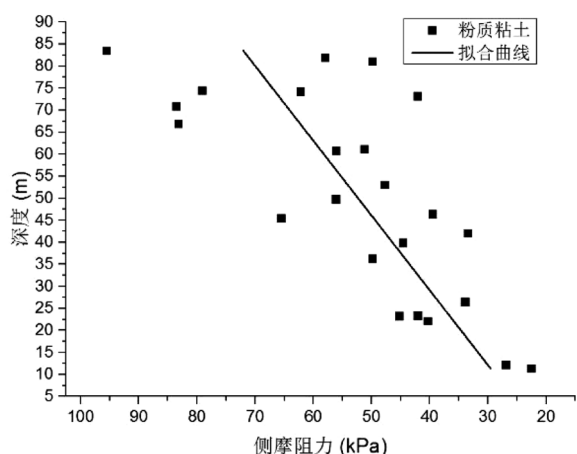


图6 粉质粘土深度与侧摩阻力关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between silty clay depth and lateral friction

但是深度对静探曲线的影响不同于夯实作用,随深度的增加摩阻比散点之间没有明显规律,如图4所示。

4.4 泥炭质土地层周围存在粉土原因

表2 泥炭质土物理性质

Table 2 Physical properties of peat soils

取土深度 (m)	饱和度 (%)	孔隙比	含水率 (%)	土粒比重
5.8~6.0	90	2.65	114	2.10
16.6~16.8	89	3.67	156	2.10
41.5~41.7	92	2.96	130	2.10
57.0~57.2	91	2.44	100	2.22

昆明巫家坝场地内泥炭质土呈块体,饱和度在89%以上,孔隙比为2.44~3.67,含水率为100%~156%,土粒比重为2.10~2.22。组成物质包括液相、气相和固相三种状态。其中固相物质,主要成分是有机和矿物质两部分,而其中有机物质比例较高。

泥炭土主要形成于浅水湖泊和渍水洼地中。而粉土主要形成于流水地区,土体中的黏粒被水带走,留下粉土颗粒。

1. 在滇池地区,高水位处水体表面流动不易影响水底,土体平稳沉积,形成粉质粘土;

2. 随着地壳运动,气候等因素影响,水位下降到适当高度,表面流动能够影响水底,带走水底土壤粘粒,同时水深足够深不易生长茂密水草,便形成粉土;

3. 当水位再次下降形成湿地沼泽,土地长期受地表水淹没,处于水分停滞或仅微弱流动的状态,一些喜水植被在积水沼泽中密茂生长,当植被死亡后植物残体来不及分解而呈纤维状堆积,混和原有的土壤最后便形成了泥炭质土(符必昌,2000;丁祖德,2018)。

昆明水体必然要经历上升与下降的阶段,形成泥炭质土的浅层水阶段与粉土的中层流动水阶段相邻,因而反映到地层中就是泥炭质土和粉土常排布在一起。

5 超深静力触探测试结果验证

选用临近项目(绿地项目)DZK15号桩位的82.8 m静探数据,对上文提出的三个结论进行验证:

1. 如图7所示,探头刚进入地层时受到较大的侧摩阻力,侧摩阻力最大值为140 MPa。静探

至 3 m 左右深度后,侧摩曲线恢复正常,数值回到 25 MPa 左右。此现象验证了结论一。但是绿

地项目场地的地表夯实程度不如巫家坝(原机场)项目,因此夯实影响深度只达到地下 3 m。

层底深度 (m)	地层名称	柱状图	端阻侧阻曲线		锥头阻力 (MPa)	侧壁摩阻力 (kPa)
			100	200		
1.90	杂填土				0.17	1.75
5.30	粉质黏土				0.77	41.58
7.90	泥炭质黏土				0.54	24.09

图 7 绿地项目 DZK15 号孔浅层静力触探数据

Fig. 7 Shallow static sounding data of drill DZK15 in Lvdi project

2. 整理 DZK15 号桩位内部粉质黏土层所处深度与静探侧摩阻力数据,可以发现在该孔内侧摩阻力同样随深度的增加而增加,建立线性拟合曲线如图 8 所示,拟合公式如下:

$$F_s = k_2 \times h + c_2 \quad (2)$$

其中 $k_2 = 0.83$; $c_2 = 33.90$;

F_s 表示侧摩阻力,单位为 kPa;

k_2 为侧摩阻力随深度的增长系数,单位为 kPa/m;

c_2 表示深度为零时的侧摩阻力,单位为 kPa。

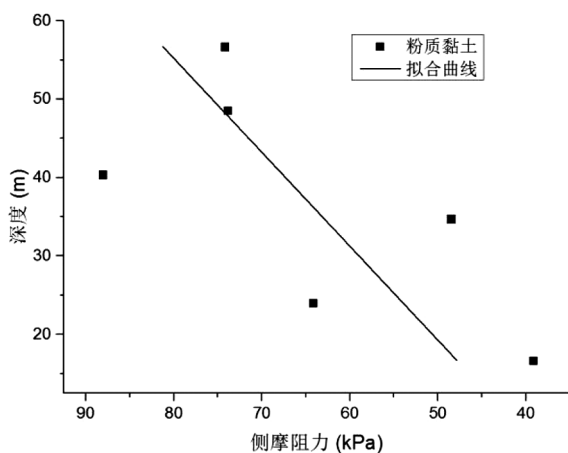


图 8 DZK15 号孔粉质粘土深度与侧摩阻力关系曲线

Fig. 8 Relation curve between silty clay depth and lateral friction of drill DZK15

3. DZK15 号桩探孔内共探查出 7 层泥炭质土,其中有 5 层与粉土层相邻,这两种土性的地层在此探孔中也表现出伴生性。

6 结论

(1) 静探测试数据与地层特性符合性高,用于

划分深厚软土地层准确、可靠。

(2) 在浅层地基中,地表土受夯实、碾压处理后,土体密实、孔隙比小,静力触探侧摩阻力偏大。当静探到一定深度后,夯实效果减弱,侧摩阻力恢复正常。

(3) 在深层地基中静力触探侧摩阻力均随深度的增加而增大,且与深度成比例。因此超深静力触探实验通过侧摩阻力判断土层性质时,需要对侧摩阻力进行修正后才可使用。

(4) 深部泥炭质土与粉土常相伴出现,与滇池曾历史水位多次变动有关。

[参考文献]

陈锦. 2021. 静力触探试验在地铁车站工程勘察中的应用[J]. 福建建材, (04): 20-23.

丁祖德,付江,李夕松,等. 2018. 昆明泥炭质土的物理力学指标特征及相关性分析[J]. 公路工程, 43(04): 86-91.

符必昌,黄英,李琴书,等. 2000. 昆明盆地浅层软土成因及工程地质分类研究[J]. 昆明理工大学学报, (05): 22-26.

付超. 2013. 静力触探实验在土层划分中的应用研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 26(02): 305-308.

高敬. 2016. 深层静力触探估算钻孔灌注桩承载力研究[J]. 铁道勘察, 42(01): 52-55.

皇富强. 2021. 静力触探与扁铲侧胀试验在工程勘察中的综合应用[J]. 水科学与工程技术, (02): 84-88.

黄启霖. 2019. 高精度磁法在柬埔寨王国贡布省速富县本库比铁矿的勘查效果[J]. 贵州地质, 36(4): 352-358.

李思发,李亮,赵伟立. 2021. 遥感技术在广西矿山开发占损土地中的应用[J]. 贵州地质, 38(3): 344-350.

刘玮. 2007. 桩侧阻力影响因素分析[J]. 国外建材科技, (02): 112-114.

刘举,刘寒鹏,杜东菊. 2012. 吹填土静力触探测试及主要特性分析[J]. 岩土工程技术, 26(03): 141-144.

邵水松,孙永俊. 2012. 深层静力触探原位测试操作的技术改进措

施[J]. 浙江建筑,29(11):23-27.
 王钟琦. 2000. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, (05):517-522.
 王锦艳. 2016. 静力触探试验在岩土工程勘察中的应用[J]. 资源信息与工程,31(06):91-93.
 王波,李建强,冯涛,等. 2016. 超深孔压静力触探在工程勘察的应用[J]. 铁道工程学报,33(08):44-49.
 羊文,张西君,冯娟,等. 2021. 充电法和高密度电法在贵州贞丰者相二金矿岩溶勘查中的应用[J]. 贵州地质, 38(2):192-200.
 詹旺林,雷声,高鸿. 2021. 静力触探推测滑裂面技术在滑坡治理中的应用[J]. 水利规划与设计, (09):98-101.

Application of Ultra-deep Static Penetration Test in Wujiaba Soft Soil Site Exploration in Kunming

DING Xi-quan¹, LIU Hai-jun¹, GUO Xiao-xia², WANG Xin¹, LIU Xing-guo¹

(1. *China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd, Chongqing 401121, China*; 2. *Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116000, Liaoning, China*)

[**Abstract**] Wujiaba in Kunming is located in the Dianchi lake basin. In some areas, its quaternary layer is more than 100 meters thick, which contains multiple layers of peat soft interlayer. This seriously restricts the design of foundation pit and foundation. In order to solve this problem, an ultra-deep static contact detection test was carried out on the soil layer at a depth of 90 meters in the site by improving the static contact test method. Combined with the results of indoor geotechnical experiment, the data of static exploration and borehole were compared. The results show that: (1) The formation information reflected by static exploration is basically consistent with that obtained by field drilling, and the data is consistent with the data of surrounding projects; (2) Under the influence of previous engineering activities, the empirical value of lateral friction resistance and friction resistance of static contact is relatively large for strata within 10 m depth of the surface; (3) Soil depth within 90 m, the lateral friction resistance increases with the depth; (4) Peat soil and silt often appear together. Combined with the soil formations, such characteristic is caused by the change of water level in Dianchi Lake.

[**Key Words**] Ultra-deep cone penetration test; Lateral friction resistance; Peat soil; Silt; Stratigraphic classification; Kunming

(上接 173 页)

the mining area, a practical research on the directional branch drilling technology with wire rope coring drill pipe as the main drill string is carried out. According to the geological design, the sidetrack branch point is selected, and the professional software is used to design and track the drilling trajectory, and design the supporting tools such as the sidetrack bit, the cable faucet, and the directional joint. Through the selection of bottom-hole power tools, drill bits, directional instruments, mud pumps and other key equipment and equipment, explore sidetracking branching technology, directional drilling technology, and steady-angle drilling technology that match the wire-line coring technology. By analyzing the deflection law, optimizing the drilling combination and drilling parameters, the drilling trajectory is finely controlled. Successfully implemented the first small-diameter directional branch hole in Guizhou, successfully hit the target with an accuracy of 8.02 m, and verified the feasibility of implementing the overall scheme of small-diameter directional branch hole by ‘directional drilling + conventional wireline coring drilling’ It provides technical support for green exploration, technical support for strategic mineral precision exploration and ecological civilization construction.

[**Key Words**] Directional drilling; Cord coring; Directed branching; Small diameter; Drilling path; Zhexiang gold Deposit in Zhijin; Guizhou