

DOI: 10.11779/CJGE2014S2019

# 武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究

屈若枫<sup>1,2</sup>, 徐光黎<sup>1</sup>, 王金峰<sup>2</sup>, 马 郢<sup>3</sup>, 李江龙<sup>2</sup>, 冯 双<sup>1</sup>, 张方涛<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430074;  
3. 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 武汉地区深基坑工程中的土体强度指标一般都是通过直接快剪试验获得, 获得的参数往往较为独立, 虽然较为简洁, 但由于其较强的区域适用性以及未能模拟出土体的天然状态, 由此得到的土体强度指标具有一定的局限性, 且物理力学指标的相关性较为模糊。为了更好地研究武汉地区典型软土物理力学指标, 以武汉地区软土深基坑工程为基础, 研究基于武汉地区近10个典型软土深基坑工程共计400余组数据, 对武汉地区软土物理力学参数性质进行了详细的研究。结合传统的数学分析方法, 较为客观地分析了武汉地区工程地质特征、系统的分析了武汉地区深厚淤泥质土物理力学参数及其指标间的相关性, 得出结论: 典型软土层中物理指标天然密度、干密度、液限、塑限、饱和度等服从正态分布; 在抗剪强度指标的统计分布规律中, 在不同试验条件下, 针对不同的土层, 服从正态分布的物理量会随之发生一定的变化。

**关键词:** 软土; 深基坑; 抗剪强度; 指标

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0113-07

**作者简介:** 屈若枫(1988-), 男, 湖北荆州人, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定性、地基处理及基坑工程等方面的研究工作。E-mail: quruofeng@hotmail.com.

## Correlations of physical and mechanical properties of typical soft soils in Wuhan

QU Ruo-feng<sup>1,2</sup>, XU Guang-li<sup>1</sup>, WANG Jin-feng<sup>2</sup>, MA Yun<sup>3</sup>, LI Jiang-long<sup>2</sup>, FENG Shuang<sup>1</sup>, ZHANG Fang-tao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan 430074,  
China; 3. Central Southern Geotechnical Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The shear strength indices of deep foundation pits in Wuhan area are generally acquired through direct shear tests. They are simple and locally applicable and fails to simulate the natural state of soils. Thus, the soil strength parameters obtained have certain limitation, and the correlations of physical and mechanical properties are also vague. In order to study the correlations of physical and mechanical properties of typical soft soils in Wuhan, based on the deep excavation of soft soils in Wuhan area, four hundred groups of data from 10 projects in Wuhan are adopted. Physical and mechanical parameters of soft soils in Wuhan are studied. Combined with the traditional methods of mathematical analysis, the engineering geological characteristics are investigated, and the correlations between the physical and mechanical parameters and their indices are analyzed. The results show the physical indices of typical soft soils, such as natural density, dry density, liquid limit, plastic limit and saturation, are in normal distribution. The statistical distribution of shear strength indices indicates that the normal distribution of physical parameters will change with different experimental conditions for different soils.

**Key words:** soft soil; deep foundation pit; shear strength; parameter

## 0 引言

由于软土基坑工程设计及研究, 涉及到的岩土体物理力学参数较多, 因此, 对于岩土体参数自身性质的研究以及其物理力学参数之间的关系研究显得非常重要。国内外的学者, 诸如马海鹏<sup>[1]</sup>、苏卫卫<sup>[2]</sup>对上海地区的岩土体参数之间的关系进行了相关研究, 刘雪梅<sup>[3]</sup>、吴长富等<sup>[4]</sup>对杭州地区的抗剪强度指标的概率分布以及变异性进行了相关研究; 储团结等<sup>[5]</sup>、徐

佳成等<sup>[6]</sup>对于静力触探试验比贯入阻力  $P_s$  与抗剪强度指标之间的关系进行了深入研究, 目前而言, 日本工程界也较为赞同  $p_s$  值同抗剪强度指标之间的关系研究, 而且技术较为成熟, 徐光黎<sup>[7]</sup>从日本标准贯入试验方法入手, 深入研究了其  $N$  值在岩土工程中的应用,

基金项目: 武汉市建设科研项目(201223)

收稿日期: 2014-07-28

探讨了  $N$  值和其他物理力学参数的关系<sup>[7]</sup>; 由日本岩土工程学会出版的《 $N$  值と  $c$ ,  $\varphi$  の活用法》深入分析了  $N$  值和  $c$ ,  $\varphi$  值之间的关系; 2009 版《基坑工程手册》<sup>[8]</sup>总结了国内主要软土地区的研究现状, 包括长三角地区、珠三角地区、杭州地区, 还包括国外的成熟研究成果, 区域性地总结了抗剪强度指标同其他物理力学参数之间的内在联系。然而, 面对如此复杂的武汉地区的工程地质条件, 包括湖北省地方标准《基坑工程技术规程》<sup>[9]</sup>在内的诸多规范并没有对武汉地区的深基坑软土的抗剪强度指标相关性进行深入研究, 亦没有系统的研究体系, 研究几乎是一块空白, 具有较大进步空间。

因此, 为了兼顾工程的稳定性和经济合理性, 更好地了解研究区域岩土体的物理力学参数, 较准确地研究出武汉地区典型软土物理力学参数之间的内在联系性, 研究以武汉地区典型软土工程为主, 主要围绕软土体主要物理力学参数(密度、含水率、液限、泊松比、黏聚力、内摩擦角、弹性模量、刚度系数等)进行试验研究, 主要包括直剪、三轴、静力触探、标准贯入等多项试验, 就武汉地区软土(研究对象为处于 3.2~7.8 m 深度的淤泥质粉质黏土层)抗剪强度指标同物理参数之间的的相关性进行了深入分析。

## 1 武汉地区的软土分布特征

软土在中国分布十分广泛, 在东部沿海区域、三角洲地区以及内陆江、河、湖分布较广的区域均有分布。由于软土具有其独特的土体性质(比如含水率高, 压缩性好以及抗剪强度低等), 在软土地基上修建高层建筑或较复杂的地下建筑时, 不仅会产生较大的沉降, 而且还有可能由于地基承载力不足而发生滑动破坏等一系列的问题, 从而严重影响施工安全和工程质量, 带来重大经济损失。然而武汉地处长江和汉江夹角地带, 广泛存在深厚软土层, 如湖相沉积的南湖、后湖片区, 河漫滩相的青山、汉口的大片区域, 武汉软黏土的基本特性, 既具有一般软黏土的共性, 又具有其自身的特点, 主要表现在黏粒含量和界限含水率较高, 孔隙比较大。随着武汉地区城市建设的高速发展, 高层建筑和地下建筑日新月异, 深基坑开挖与支护技术得到了前所未有的发展, 软土的广泛分布给城市建设带来了前所未有的挑战。

由于软土物理力学性质的特殊性, 它是包括黏土、粉土、淤泥质土等多种土层在内的土的总称, 因此, 对软土的明确定义, 不同的专业机构或者不同规范给出的解释也有所区别, 如 2009 年出版的第二版《工

程地质手册》定义为三高三低: 高含水率、高灵敏度、高压缩性、低密度、低强度、低渗透性。而《岩土工程勘察规范》则从天然孔隙比、压缩系数等方面量化了定义软土的指标。纵然从不同角度对软土的定义有所不同, 但总的来说, 软土主要是指淤泥、淤泥质土、淤泥质粉土等具有较高的含水率、较好的压缩性以及较低的抗剪强度等显著物理力学特征的土体。

## 2 软土物理力学指标的统计关系研究

研究主要采取直剪试验、三轴试验以及室外试验研究武汉地区软土物理力学性质, 物理力学参数主要包括含水率、密度、重度、土粒比重、孔隙比、饱和度、液限、塑限、黏聚力、内摩擦角等指标, 主要包括淤泥质黏土、黏土、淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂等地层。

经过统计结果显示, 基于武汉市长江一级阶地粉质黏土层、淤泥质粉质黏土层、淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂层基坑软土物理力学性质指标统计结果如表 1 所示。表 2, 3 为武汉长江一级阶地软土在不同试验条件下  $c$ ,  $\varphi$  值统计。

表 1 武汉长江 I 级阶地软土物理力学指标统计

Table 1 Physical and mechanical statistics of soft soil indices in Wuhan Yangtze I terraces

指标	样本容量 $N$	分布区间	平均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	变异系数 $\delta$
$w/\%$	386	21.4~72.6	38.15	16.08	0.42
$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	385	15.7~20.5	17.95	1.46	0.082
$\gamma_d /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	42	11.8~13.9	12.90	3.91	0.30
$e$	382	0.62~1.77	1.078	0.36	0.33
$S_p/\%$	218	88~100	96.81	10.61	0.11
$W_L/\%$	361	28.6~63.6	41.36	19.82	0.48
$W_p/\%$	362	15.6~34.1	22.98	8.39	0.37
$G_s$	79	2.71~2.76	2.74	0.076	0.028
$I_p$	316	7.4~32.3	17.31	3.07	0.23
$I_L$	311	0.1~1.7	0.806	0.178	0.257
$\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	249	0.1~1.2	0.46	0.13	0.30
$E_s/\text{MPa}$	252	1.7~25.3	5.657	1.89	0.297

表 2 武汉长江 I 级阶地软土直剪 ( $c_q$ ) 条件下  $c$ ,  $\varphi$  值统计  
Table 2 Statistics of  $c$ ,  $\varphi$  of soft soils under  $c_q$  in Wuhan Yangtze I terraces

指标	样本容量 $N$	分布区间	平均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	变异系数 $\delta$
$c/\text{kPa}$	20	7.4~21.4	12.8	17.83	1.39
$\varphi/(^\circ)$	20	5.4~18.6	11.7	11.76	1.01

表 3 武汉长江 I 级阶地软土三轴剪切 (CU) 条件下  $c$ ,  $\varphi$  值统计

Table 3 Statistics of  $c$ ,  $\varphi$  of soft soil under CU in Wuhan Yangtze I terraces

指标	样本容量 $N$	分布区间	平均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	变异系数 $\delta$
$c/\text{kPa}$	28	13.7~50.8	29.1	59.65	2.05
$\varphi/(\circ)$	28	14.3~31.1	22.7	20.44	0.90

## 2.1 武汉地区的软土的典型特征

根据武汉市长江一级阶地诸多基坑工程岩土体室内试验结果和大量的工程实践经验, 在充分了解了武汉市长江一级阶地的特殊地质环境条件下, 对该类场地 400 余例软土样本的主要物理力学性质进行分析, 得到以下初步结果:

### (1) 天然含水率 $w$ 相对较均匀

天然含水率较均匀, 根据室内土工试验,  $w$  值主要集中在 21.4%~72.6% 之间, 平均值为 38.15%。其中第二层粉质黏土含水率总体为大于塑限, 小于液限; 而第三层淤泥质粉质黏土和第四层淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂的含水率则普遍大于其液限值, 且其主要集中在 6.7~15.3 m 之间, 总的液限值变化在 28.6%~63.6%, 平均 41.36%; 塑性指数  $I_p$  集中变化在 7.4~32.3, 平均值 17.31, 且 3 个土层相差不大, 土中黏粒含量较多, 亲水性矿物质较多。

### (2) 压缩性 $a_{1-2}$ 较高

土的压缩系数除第二层粉质黏土  $0.34\sim0.58 \text{ MPa}^{-1}$  基本呈中等压缩性, 第三、四层的淤泥质粉质黏土和淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂  $0.51\sim1.20 \text{ MPa}^{-1}$  明显呈高压缩性, 而且压缩系数往往随孔隙比、液限、含水率的增高而增高, 明显符合武汉市长江一级阶地的特殊软土地质环境。

### (3) 天然重度小、孔隙比大

场区软土体天然湿重度变化范围为  $15.7\sim20.5 \text{ kN/m}^3$ , 平均  $17.95 \text{ kN/m}^3$ ; 而干重度则变化范围为  $11.8\sim13.9 \text{ kN/m}^3$ , 平均  $12.9 \text{ kN/m}^3$ , 整体来看天然重度普遍较小。孔隙比变化范围为  $0.619\sim1.767$ , 均值为  $1.078>1.0$ , 可知孔隙比较大, 对基坑变形及建筑物的沉降影响较大。

### (4) 抗剪强度较低

通过室内直剪, 反映出软土体抗剪强度较低。试验结果显示  $c$  值变化范围为  $7.4\sim21.4 \text{ kPa}$  内, 均值为  $13.0 \text{ kPa}$ ; 而摩擦角变化范围为  $5.4^\circ\sim18.6^\circ$ , 均值为  $11.7^\circ$ 。

### (5) 结构性较强

武汉市长江一级阶地软土具有显著的结构性, 一旦受到扰动, 结构很容易受到影响, 土的强度将明显

降低。因此, 在进行工程施工过程中应力求避免土的过分扰动。

## 2.2 软土物理力学指标的统计关系

根据武汉市长江 I 级阶地大量的工程实践并结合试验结果认为, 影响软土的压缩性能的物理指标主要是液限、含水率和天然孔隙比, 因此, 拟用数理统计的方法来分析软土的抗剪强度及压缩性能与土的物理力学指标间的相互关系和分布规律。限于软土层的典型性以及文章篇幅考虑, 此小节仅简述直剪试验条件下武汉长江 I 级阶地淤泥质粉质黏土层物理力学性质指标统计关系。

分析方法主要采用数理统计中一元线性回归、多项式、指数非线性回归方法, 最小二乘法来拟合最佳曲线, 对各种物理力学指标进行显著性检验。

对于一元线性拟合方法, 又称直线拟合, 是根据一组大致符合线性关系  $y=a+bx$  的测量数据, 用适当的方法求出  $a$ 、 $b$  的最佳值, 最终确定拟合曲线的表达式  $y=a+bx$ 。具体方法如下:

对于大致满足线性关系的一组测量数据  $(x_1, y_1)$ , 假定自变量  $x_1$  的误差可以忽略, 则在同一自变量  $x_1$  下, 测量点  $y_1$  和直线  $y=a+bx$  上点的误差  $d_1$  表示为

$$d_1 = y_1 - (a + bx_1),$$

$$d_2 = y_2 - (a + bx_2),$$

$$d_m = y_m - (a + bx_m).$$

按照最小二乘准则, 令误差平方和为

$$F = \sum_{i=1}^m d_i^2 = \sum_{i=1}^m [y_i - (a + bx_i)]^2.$$

$F$  对  $a$  和  $b$  分别求一阶偏导数为

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^m (a + bx_i - y_i) = 2 \left[ ma + b \sum_{i=1}^m x_i - \sum_{i=1}^m y_i \right],$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^m (a + bx_i - y_i) x_i = 2 \left[ a \sum_{i=1}^m x_i + b \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i y_i \right].$$

令  $\frac{\partial F}{\partial a} = 0$ ,  $\frac{\partial F}{\partial b} = 0$ , 得到方程组:

$$ma + b \sum_{i=1}^m x_i = \sum_{i=1}^m y_i,$$

$$a \sum_{i=1}^m x_i + b \sum_{i=1}^m x_i^2 = \sum_{i=1}^m x_i y_i.$$

此方程组为正规方程组, 求解正规方程组可得到  $a$ ,  $b$ , 从而可得到一元线性回归下的拟合曲线。

针对非线性拟合是因为很多情况下试验数据是非线性的, 需要用非线性函数来拟合这些数据。因此, 可以通过变量代换将非线性关系化成线性形式, 再按线性拟合的方法求出参数值, 最后再通过变量回带求出原来的参数值。这样的方法称为线性化方法。如果

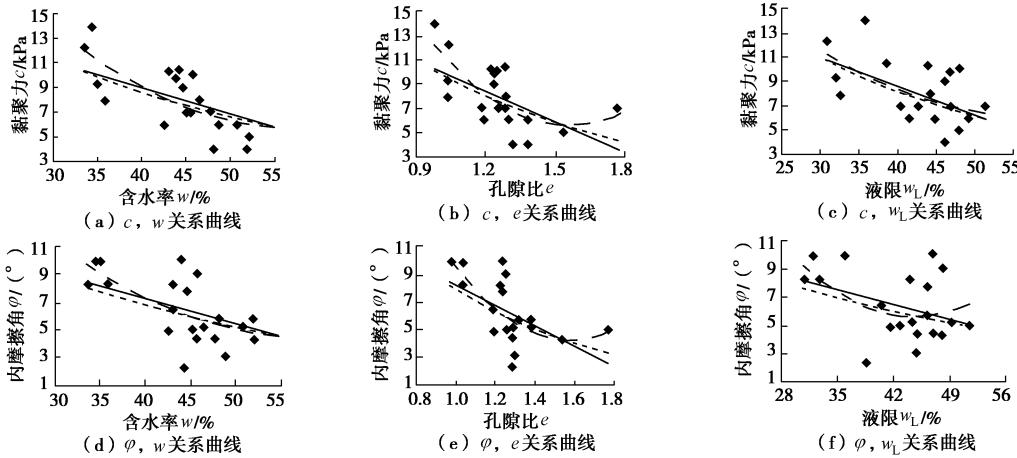


图 1 武汉长江 I 级阶地淤泥质粉质黏土层 (cq 试验) 物理力学性质指标统计关系

Fig. 1 Correlations of physical and mechanical properties of soft soils (cq) in Wuhan Yangtze I terraces

选用多项式来拟合非线性数据, 则称之为多项式拟合。本文对基坑软土各种物理力学指标的统计分析也包含多项式回归。

已知  $m$  组非线性数据  $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 试用  $n$  次多项式

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (n < m - 1),$$

$$F = \sum_{i=1}^m \left[ y_i - (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n) \right]^2$$

对其进行拟合, 使误差平方和  $F$  到最小值, 确定拟合多项式。

根据线性化方法, 可以将多项式拟合转化为多元线性拟合求其参数。

对于  $n$  次多项式  $y = \sum_{j=0}^n a_j x^j$ , 只要令  $t_j = x^j$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, n$ ), 就可转化为线性形式  $y = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j t_j$ , 具体实现过程如下:

设  $m$  个试验点  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  令  $t_{ij} = x_i^j$ , 代入多元线性拟合正规方程组得

$$\begin{aligned} ma_0 + \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m x_i^j \right) a_j &= \sum_{i=1}^m y_i, \\ \sum_{i=1}^m a_0 x_i^k + \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m x_i^{j+k} \right) a_j &= \sum_{i=1}^m x_i^k y_i \quad (k = 1, 2, \dots, n). \end{aligned}$$

写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^n \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n y_i \end{pmatrix}.$$

这是一个含有  $n+1$  个未知数,  $n+1$  个方程的线性方程组, 可直接求出参数  $a_0, a_1, \dots, a_n$  的值。

回归计算式为

$$y = a + bx, \quad (1)$$

$$y = c + bx + ax^2, \quad (2)$$

$$y = ae^{bx}. \quad (3)$$

来对武汉长江一级阶地基坑软土的物理力学指标之间的关系进行统计, 基坑软土物理力学指标之间的关系如图 1 所示, 其汇总表如表 4 所示。

从图 1 可以直观地看出, 通过以软土力学指标黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  为因变量, 软土物理指标含水率、孔隙比和液限为自变量来进行相关性分析, 分析可知: 在武汉市长江一级阶地软土淤泥质粉质黏土层 (一般 3.2~7.8 m) 中, 直剪试验条件下的抗剪强度指标  $c, \varphi$  值与含水率、孔隙比、液限几乎都呈很好的负相关性, 随着含水率、孔隙比和液限的降低而降低, 通过此回归方程可以来估算武汉市长江一级阶地淤泥质粉质黏土层的物理力学特性。

### 2.3 武汉市长江 I 级阶地基坑软土物理力学性质指标统计分布规律

在研究连续型总体时, 往往先考虑它是否服从正态分布。用来检验总体正态性的方法较多, 但偏度、峰度检验法较为有效。

#### (1) 样本偏度与峰值

设  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为从总体  $F$  中抽取的样本, 则称为样本偏度:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{m_{n,3}}{m_{n,2}^{3/2}} = \sqrt{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 / \left( \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right)^{3/2}.$$

它反映了总体偏度的信息, 总体偏度定义为  $\beta_1 = \mu_3 / \mu_2^{3/2}$ , 此处  $\mu_i (i=2,3)$  是总体的  $i$  阶中心矩。 $\beta_1$  是反映总体分布的非对称性或“偏倚性”的一种度量。

表 4 武汉长江 I 级阶地淤泥质粉质黏土层 (cq 试验) 物理力学性质指标统计关系  
Table 4 Correlations of physical and mechanical properties of soft soils (cq) in Wuhan Yangtze I terraces

样本容量	因变量	自变量	回归方程	相关系数 $R^2$
21	$c$	$w$	$c = -0.219w + 17.85$	0.375
			$c = 0.010w^2 - 1.197w + 40.59$	0.504
			$c = 25.40e^{-0.02w}$	0.340
21	$c$	$e$ (孔隙比)	$c = -8.563e + 18.76$	0.333
			$c = 19.28e^2 - 60.23e + 52.70$	0.478
			$c = 28.28e^{-1.04e}$	0.300
21	$c$	$w_L$	$c = -0.235w_L + 18.06$	0.283
			$c = 0.006w_L^2 - 0.739w_L + 28.03$	0.289
			$c = 25.78e^{-0.02w_L}$	0.252
21	$\varphi$	$w$	$\varphi = -0.181w + 14.55$	0.316
			$\varphi = 0.008w^2 - 0.961w + 32.67$	0.418
			$\varphi = 19.89e^{-0.02w}$	0.238
21	$\varphi$	$e$	$\varphi = -7.630e + 15.99$	0.326
			$\varphi = 16.29e^2 - 51.29e + 44.66$	0.454
			$\varphi = 25.29e^{-1.15e}$	0.255
21	$\varphi$	$w_L$	$\varphi = -0.153w_L + 12.96$	0.149
			$\varphi = 0.019w_L^2 - 1.699w_L + 43.55$	0.219
			$\varphi = 14.60e^{-0.02w_L}$	0.095

正态分布  $N(a, \sigma^2)$  的偏度为零。

设  $X_1, \dots, X_n$  为从总体  $F$  中抽取的样本, 则称

$$\hat{\beta}_2 = \frac{m_{n,4}}{m_{n,2}^2} - 3 = \sqrt{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 / \left( \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right)^2 - 3 \quad \text{为}$$

样本峰度。它反映了总体峰度的信息, 总体峰度的定义是  $\beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2 - 3$ , 其中  $\mu_i (i=2, 4)$  如前所述。 $\beta_2$  是反映总体分布密度函数在众数(即密度函数的最大值点)附近“峰”的尖削程度的一种度量。正态分布  $N(a, \sigma^2)$  的峰度为零。

若连续型总体数据的偏斜度、峰值都接近于零, 则可以认为这个总体数据是来自正态总体的; 如果其峰值为正, 则表示其相对正态分布是尖锐的; 如果其峰值为负, 则表示其相对正态分布是平坦的。

## (2) 拒绝域

设  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是从总体  $X$  中抽出的样本, 来检验假设  $H_0: X$  为正态总体。

$$\text{设 } \sigma_1 = \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}, \sigma_2 = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}},$$

$$\mu_2 = 3 - \frac{6}{n+1}, \quad u_1 = \beta_1 / \sigma_1, \quad u_2 = (\beta_2 - \mu_2) / \sigma_2.$$

一般说来, 当  $|u_1|, |u_2|$  值过大时, 就会拒绝  $H_0$ 。取显著性检验水平  $\alpha=0.1$ , 则  $H_0$  的拒绝域为

$$|u_1| = |\beta_1 / \sigma_1| \geq z_{\alpha/4} = 1.96,$$

$$|u_2| = |(\beta_2 - \mu_2) / \sigma_2| \geq z_{\alpha/4} = 1.96.$$

据以上正态检验方法, 得出武汉市长江一级阶地基坑淤泥质粉质黏土层的物理力学指标的分布规律如表 5~7 所示。

表 5 武市长江 I 级阶地淤泥质粉质黏土层物理力学指标统计分布规律

Table 5 Distribution of physical and mechanical parameters and their indices of deep silt soils in Wuhan Yangtze I terraces

指标	样本 峰度	样本 偏度	$u_1$	$u_2$	正态检 验结果	分布 形态
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$				
$w/\%$	2.473	0.865	6.080	2.805	拒绝	非正态 分布
$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	-0.215	0.535	0.425	2.787	接受	正态 分布
$\gamma_d /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	-0.903	0.872	1.786	2.350	接受	正态 分布
$e$	3.922	1.209	9.642	2.310	拒绝	非正态分 布
$S_r/\%$	-0.869	-0.486	1.823	4.253	接受	正态 分布
$W_L/\%$	0.122	-0.837	0.300	5.257	接受	正态 分布
$W_p/\%$	-0.878	-0.456	1.842	4.214	接受	正态 分布
$G_s$	0.676	-1.077	1.337	4.878	接受	正态 分布

由表 5~7 可知, 武市长江一级阶地淤泥质粉质黏土层中物理指标天然重度、干密度、饱和度、液限、塑限等服从正态分布; 在抗剪强度指标的统计分布规律中 qq 试验条件下  $c$  值服从正态分布, cq 试验条件下  $c$ ,  $\varphi$  值都服从正态分布; qq 试验条件下的  $\varphi$  值服从近似正态分布, 其余物理力学指标则服从非正态分布。通过以上物理力学指标的统计分析可以估测或者确定武汉市长江一级阶地基坑软土淤泥质粉质黏土层的物理力学参数, 同时在抗剪强度指标  $c$ ,  $\varphi$  值得选取过程中,

选用何种试验方法也有着重要的参考意义。

表 6 武汉市长江 I 级阶地淤泥质粉质黏土层  $c, \varphi$  (qq 试验)

#### 统计分布规律

Table 6 Distribution of  $c, \varphi$  (qq) of silt soils in Wuhan Yangtze I terraces

指标	样本峰度 $\hat{\beta}_1$	样本偏度 $\hat{\beta}_2$	$u_1$	$u_2$	正态检验结果	分布形态
$c/kPa$	0.098	0.549	0.206	2.883	接受	正态分布
$\varphi/(^\circ)$	-1.052	0.223	2.207	3.315	拒绝	近似正态分布

表 7 武汉市长江 I 级阶地淤泥质粉质黏土层力学指标 (cq 试验) 统计分布规律

Table 7 Distribution of  $c, \varphi$  (cq) of silt soils in Wuhan Yangtze I terraces

指标	样本峰度 $\hat{\beta}_1$	样本偏度 $\hat{\beta}_2$	$u_1$	$u_2$	正态检验结果	分布形态
$c/kPa$	2.650	1.552	4.190	1.154	接受	正态分布
$\varphi/(^\circ)$	-0.51	0.180	0.803	3.021	接受	正态分布

#### 2.4 不同试验条件下软土抗剪强度指标间关系

为了更好地研究武汉地区典型软土的物理力学性质指标间的关系, 本小节从实际出发, 统计了直剪和三轴试验条件下的  $c, \varphi$  值, 并进行了相关数理统计, 得出的关系如图 2 所示。在数据有限的情况下, 通过图 2 可以很清楚地看到:

(1) 各自试验条件下的抗剪强度指标关系均呈现一定的关联性, 其中三轴试验条件下指标间的关系相对直剪条件下的数据较为理想, 造成的原因主要是直剪试验过程中样品的剪切面上的剪应力分布不均匀, 而且不能控制排水, 这就导致得出的抗剪强度指标不能真实的反应土体力学性质。

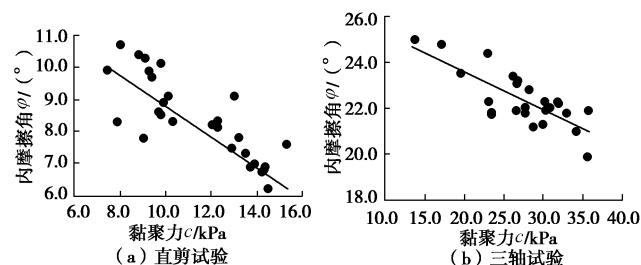


图 2 抗剪强度指标  $c, \varphi$  之间的关系

Fig. 2 Relationship between  $c$  and  $\varphi$

(2) 从数据可以看出, 直剪试验条件下的数据变化区间是较小的, 而三轴条件下的数据区间则较大, 说明在进行三轴试验的过程中, 把握试验的进度有一定的困难, 容易产生误差。

(3) 从  $R^2$  的数值大小容易看出, 就目前的样本

数量而言三轴条件下的拟合度较好, 达到了 0.6, 略高于直剪的 0.53。总的来说, 三轴试验的数据要比直剪试验更可靠。

### 3 结 论

根据武汉市诸多典型深基坑工程岩土体室内试验结果及大量的工程实践经验, 针对武汉市基坑工程设计涉及到的较显著的物理力学参数, 对域内场地软土主要物理力学性质进行了分析, 分析认为影响软土的压缩性能的物理指标主要是液限、含水率和天然孔隙比, 应用数理统计的方法来分析软土的抗剪强度及压缩性能与土的物理力学指标间的相互关系和分布规律, 得出以下 5 点结论。

(1) 研究土层(淤泥质粉质黏土层)具有天然含水率  $w$  相对较均匀、压缩性  $a_{1-2}$  较高、天然重度小、孔隙比大、抗剪强度较低、渗透性中等以及结构性较强等显著特点。

(2) 通过对各种物理力学指标进行显著性检验并进行分析可知, 在域内软土层中, 对于不同的试验, 不同物理参数的相关性程度有一定的变化。

(3) 典型软土层中物理指标天然密度、干密度、液限、塑限、饱和度等服从正态分布; 在抗剪强度指标的统计分布规律中, 在不同试验条件下, 针对不同的土层, 服从正态分布的物理量会随之发生一定的变化。通过一定量的物理力学指标的统计分析可以估测或者确定域内相关土层的物理力学参数, 同时在抗剪强度指标  $c, \varphi$  值的选取过程中, 针对不同的土层, 选用何种试验方法也有着重要的参考意义。

(4) 从各试验条件下  $c, \varphi$  值之间的关系来看, 三轴试验的数据拟合度要比直剪试验更可靠, 在工程实践中应提倡三轴试验进行参数取值。

(5) 本文研究武汉地区软土体抗剪强度与土体物理力学参数之间的相关关系, 是首次针对武汉地区岩土体该方向的研究, 为后续学者进行相关研究提供了参考和借鉴的意义。

### 4 展 望

由于时间和试验条件等客观因素的影响, 本文在如下方面尚存一定的不足, 需进一步进行研究并期待可以解决:

(1) 取样精确度和试验取值精确度都需进一步完善。在国内现行的取样手段中, 对取样的规范程度和取样试验方法都存在比较大的不足, 现行的各种取样手段, 包括薄壁取样在内, 都会对原状土产生一定的扰动, 如何对类似这样的样品所获取的参数进行修正,

是课题研究延续中的一个值得注意的问题。

(2) 在本文进行软土的抗剪强度及压缩性能与土的物理力学指标间关系分析时, 由于取样的困难以及取样的精确度问题, 导致部分研究领域的样品数不够, 这样就容易造成成果分析的不准确, 在日后的研究中也是需要注意的。

(3) 在探求武汉市基坑工程深厚淤泥质土物理力学指标之间的关系时, 只考虑了抗剪强度指标同物理参数之间的关系, 而目前国外已经较为成熟的抗剪强度指标同力学参数之间的关系(比如抗剪强度与弹性模量、静探比贯入阻力、标准贯入量等之间的关系)还需要进行更深入的研究, 亦是本课题后续研究的方法。

#### 参考文献:

- [1] 马海鹏. 上海地区土体抗剪强度与静力触探比贯入阻力相关关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 536 - 542. (MA Hai-peng. Correlations of soil shear strength with specific penetration resistance of CPT in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 536 - 542. (in Chinese))
- [2] 苏卫卫. 上海软黏土抗剪强度指标概率分布类型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 1695 - 1699. (SU Wei-wei. Risk analysis of the underground passage through rail transit construction scheme[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 1695 - 1699. (in Chinese))
- [3] 刘雪梅. 杭州土层抗剪强度指标概率分布模型研究[J]. 城市勘测, 2009, 1(3): 155 - 157. (LIU Xue-mei. Studies on probability distribution of shear strength indexes for several strata in Hangzhou area[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 1(3): 155 - 157. (in Chinese))
- [4] 吴长富, 朱向荣, 刘雪梅. 杭州地区典型土层抗剪强度指标的变异性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 94 - 99. (WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, LIU Xue-mei. Typical strata in Hangzhou area Studies on variability of shear strength indexes for several typical strata in Hangzhou area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 94 - 99. (in Chinese))
- [5] 储团结, 黄俊杰, 王中华. 静力触探试验确定软黏性土抗剪强度研究[J]. 路基工程, 2005, 6(1): 1 - 4. (CHU Tuan-jie, HUANG Jun-jie, WANG Zhong-hua. Research on determination for undrained shear strength of soft cohesive soil using the cone penetration test[J]. Subgrade Engineering, 2005, 6(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [6] 徐佳成, 王玉杰, 陈祖煜. 静力触探试验数据库的建立及土体参数相关性分析[J]. 岩土工程技术, 2010, 24(6): 307 - 311. (XU Jia-cheng, WANG Yu-jie, CHEN Zu-yu. Database establishment of CPT and correlation analysis of soil parameters[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2010, 24(6): 307 - 311. (in Chinese))
- [7] 徐光黎. 日本标准贯入试验方法及其N值在岩土工程中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(4): 33 - 38. (XU Guang-li. Application of SPT and N-value to geotechnical engineering in Japan[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(4): 33 - 38. (in Chinese))
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Foundation pit engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 湖北省建设厅. 基坑工程技术规程[S]. 湖北, 2004. (The Construction Department of Hubei Province, Technical specification for foundation pit engineering[S]. Hubei, 2004. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)