

# 考虑物理指标的黏性土抗剪强度指标分析

张庆贺<sup>1</sup>, 吴明明<sup>2</sup>, 张岗平<sup>2</sup>, 康宝祥<sup>3</sup>, 徐日庆<sup>4\*</sup>

(1. 徐州工业职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 徐州 221000; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 西安汽车职业大学 交通工程学院, 陕西 西安 710600; 4. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**以杭州某地区的黏性土为研究对象,通过UU、CU、CD三轴压缩试验,分析内摩擦角、黏聚力与塑性指数、含水率、液性指数之间的关系。结果表明,黏聚力与塑性指数具有较高的线性负相关性,斜率范围为-3.88~-3.34。内摩擦角与液性指数的相关性比其与其他物理指标相关性高。 $c_{cu}/c_{uu}$ 和 $c_{cd}/c_{uu}$ 随着含水率、塑性指数增加呈增大趋势。 $c_{cu}/c_{uu}$ 范围在1.1~1.9之间; $c_{cd}/c_{uu}$ 范围在1.2~2.0之间。 $c_{cd}-c_{cu}$ 范围在1~4 kPa之间;随着塑性指数的增大, $c_{cd}-c_{cu}$ 减小。 $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$ 值接近于1。 $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$ 范围在2°~6°之间,随着塑性指数增大呈下降趋势;当 $I_p > 18$ 时, $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$ 的值不再随塑性指数变化而变化。研究结果可为预估黏性土的强度参数值提供参考。

**关键词:**抗剪强度指标;黏性土;含水率;塑性指数;液性指数

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0391-07

## Analysis of shear strength index of clay considering physical indexes

ZHANG Qing-he<sup>1</sup>, WU Ming-ming<sup>2</sup>, ZHANG Gang-ping<sup>2</sup>, KANG Bao-xiang<sup>3</sup>, XU Ri-qing<sup>4\*</sup>

(1. School of Architecture Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221000, Jiangsu, China;

2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China;

3. School of Transportation Engineering, Xi'an Vocational University of Automobile, Xi'an 710600, Shaanxi, China;

4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** This study focuses on the cohesive soil in Hangzhou and analyzes the relationship between internal friction angle, cohesion, and plasticity index, as well as water content and liquid index, using triaxial compression tests (UU, CU, and CD). The results reveal a significant linear negative correlation between cohesion and plasticity index, with a slope range of -3.88 to -3.34. Moreover, the correlation between the internal friction angle and the liquid index is stronger compared to the other physical indexes. The  $c_{cu}/c_{uu}$  and  $c_{cd}/c_{uu}$  increase with the increase of  $w$  and  $I_p$ . The range of  $c_{cu}/c_{uu}$  is between 1.1 and 1.9. The range of  $c_{cd}/c_{uu}$  is between 1.2 to 2.0.  $c_{cd}-c_{cu}$  ranges from 1 to 4 kPa, and the  $c_{cd}-c_{cu}$  decreases with the increase of plasticity index. The value  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  is close to 1.  $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$  ranges from 2° to 6°, and decreases with the increase of  $I_p$ . When  $I_p > 18$ , the value of  $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$  does not change with the change of  $I_p$ . These research findings offer valuable references for predicting the strength parameters of clay.

**Key words:** shear strength index; cohesive soil; water content; plasticity index; liquidity index

## 0 引言

土体的抗剪强度指标是岩土工程勘察设计及施工中重要的参数,土的内摩擦角和黏聚力主要涉及到地基承载力、挡土墙土压力和土坡稳定等计算,是土力学计算分析的重要参数。抗剪强度指标与土体自身的物理性质存在关联。土体物理力学性

质对工程经济性和安全性有重要影响,很早就引起岩土工程学者们的关注<sup>[1-5]</sup>。

关于细粒土及区域性特殊土的物理力学参数之间的关系,国内外学者通过大量的土工试验,利用统计分析方法做了深入研究。郑轶轶等<sup>[6]</sup>,陈斌等<sup>[7]</sup>给出了宁波地区软土力学指标与物理指标之间的经验公式。邢鲜丽等<sup>[8]</sup>通过对黄土的三轴固结

收稿日期: 2022-09-26

作者简介: 张庆贺(1985—),女,山东菏泽人,硕士,工程师,主要从事土体物理力学性能及地下结构工程研究。E-mail: zhangqinghe\_198@163.com。

\*通信作者: 徐日庆(1962—),男,浙江金华人,博士,教授,主要从事土的本构模型、土压力计算理论和隧道工程的研究工作。E-mail: xurq@zju.edu.cn。

不排水试验,发现黏聚力能反映出有效残余抗剪强度与含水率的关系。赵蕊等<sup>[9]</sup>对贵阳重塑红黏土进行了不固结不排水研究,得出抗剪强度随含水率呈二次函数降低的关系。滕延京等<sup>[10]</sup>通过原状土的室内试验方法对比,提出了针对实际工程问题获取饱和黏性土抗剪强度的试验方法。赵晶等<sup>[11]</sup>对国内不同地域岩土勘察数据收集整理,利用概率统计方法得到土体强度参数与土体物理参数之间的关联关系。SPAGNOLI等<sup>[12]</sup>调查研究了黏土的界限含水率与不排水剪切强度之间的相关性,得到了黏土的液性指数和含水率的比值与黏土的不排水抗剪强度值有很好的对应关系。唐军平等<sup>[13]</sup>利用数理统计方法深入分析了佛山地基软土的物理力学指标,指出该地区软土的孔隙比与天然含水率之间具有较好的线性相关关系。郭林坪等<sup>[14]</sup>、李旭昶等<sup>[15]</sup>通过整理分析原状土的土工试验数据,建立了土体的物理指标与力学参数间的函数表达式。张崇磊等<sup>[16]</sup>通过对比粉质黏土的直剪试验和固结不排水三轴剪切试验结果,提出了两者抗剪强度之间的转化关系。SHIMOBÉ等<sup>[17]</sup>研究了500多个文献与试验数据,分析了重塑土与原状土的不排水抗剪强度、液性指数、含水率之间的相关性。乔峰等<sup>[18]</sup>研究了国内软土、黄土和红土的工程特性,得到了3种特殊土各项物理力学指标间的分布规律。

从国内外相关文献看,研究直剪快剪强度物理力学指标的较多,但研究三轴试验物理力学指标的相对较少,用三轴试验强度指标对比分析的试验更为少见。三轴压缩试验能控制固结排水情况、大小主应力,且剪切面不固定,能较为真实地反映土体的实际破坏情况,但试验数据获得较为繁琐。本文主要考虑含水率、塑性指数及液性指数等物理因素进行不固结不排水(UU),固结不排水(CU),固结排水(CD)3种试验,研究3种试验对应的强度指标之间、强度指标与物理指标之间的关系,为施工设计中的强度参数值提供参考。

## 1 试验概况

采用普通取土器对杭州某工程建设期间开挖的黏性土进行取样,采用真空饱和法和饱和。经测试,同一土层物理性质较为接近,分为1组,对物理指标有较大差别的土样进行筛查排除,土体试样物理指标见表1,试验土样共5组,1组有9个土样,取平均值作为该组土样物理指标的代表值。3份用来做UU试验,3份用来做CU试验,3份用来做CD

试验。

表1 土体物理指标  
Table 1 Physical index of soil

| 土样分组  | 1组   | 2组   | 3组   | 4组   | 5组   |
|-------|------|------|------|------|------|
| 塑性指数  | 18.5 | 17.0 | 12.0 | 19.2 | 20.5 |
| 含水率/% | 29.1 | 26.5 | 23.0 | 40.0 | 45.0 |
| 液性指数  | 0.45 | 0.50 | 0.20 | 0.90 | 0.63 |

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[19]</sup>4.1.9条,该土样塑性指数均大于10,为黏性土。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 UU、CU、CD抗剪强度指标

利用Mohr-Coulomb强度理论求得5组试验土样对应的UU、CU、CD抗剪强度指标,见图1~5。

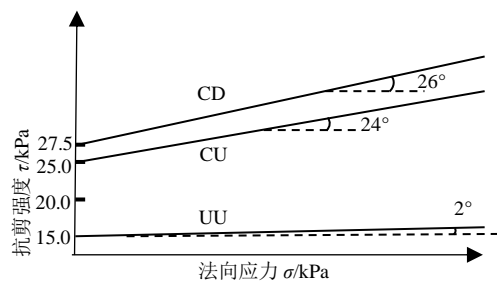


图1 第1组强度指标结果图

Fig. 1 Results of shear strength index of group 1

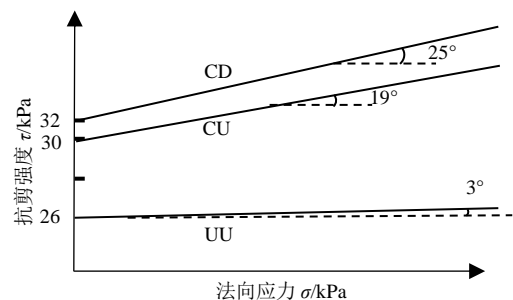


图2 第2组强度指标结果图

Fig. 2 Results of shear strength index of group 2

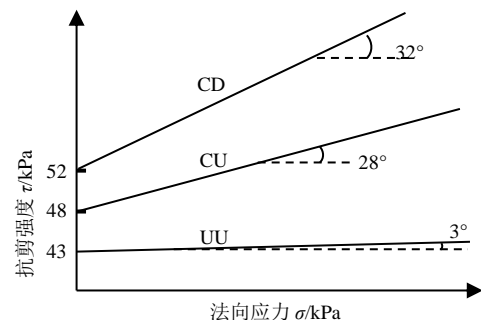


图3 第3组强度指标结果图

Fig. 3 Results of shear strength index of group 3

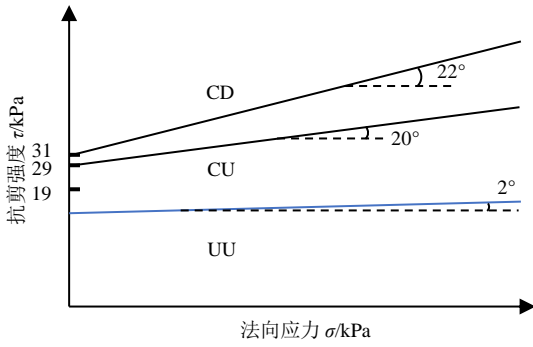


图 4 第 4 组强度指标结果图

Fig. 4 Results of shear strength index of group 4

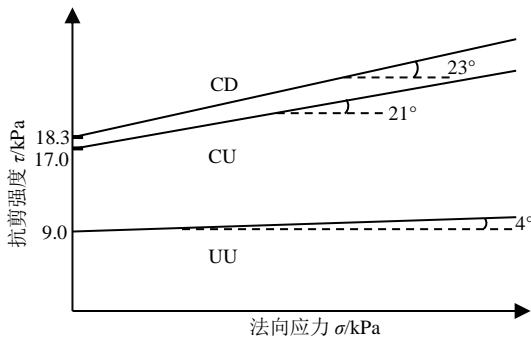


图 5 第 5 组强度指标结果图

Fig. 5 Results of shear strength index of group 5

试验土样  $c_{uu}$  在 9~43 kPa 之间,  $c_{cu}$  在 17~48 kPa 之间,  $c_{cd}$  在 18.3~52 kPa 之间。 $\varphi_{uu}$  在 2°~4° 之间,  $\varphi_{cu}$  在 19°~28° 之间,  $\varphi_{cd}$  在 22°~32° 之间。结果显示,  $c_{cd} > c_{cu} > c_{uu}$ ;  $\varphi_{cd} > \varphi_{cu}$ 。

## 2.2 黏聚力与物理指标的关系

### (1) 黏聚力与塑性指数关系

塑性指数为黏性土重要的物理指标之一, 研究塑性指数与黏聚力的关系具有重要意义。该试验黏性土塑性指数在 12~21 之间, UU, CU, CD 试验测得的黏聚力与塑性指数具有较好的线性负相关性(图 6)。经处理后得到 3 种黏聚力与塑性指数的关系为式(1)~(3)。

不固结不排水试验黏聚力:

$$c_{uu}/c_0 = -3.88I_p + 90.15 \quad (1)$$

固结不排水试验黏聚力:

$$c_{cu}/c_0 = -3.34I_p + 88.01 \quad (2)$$

固结排水试验黏聚力:

$$c_{cd}/c_0 = -3.63I_p + 95.40 \quad (3)$$

式中:  $c_0$  为一个单位黏聚力。

这与文献[3]所得整体趋势是一致的, 顾成权等[3]通过室内试验得到, 土体黏聚力  $c$  随土体含水率与土体黏粒含量比值  $m$  的增大总体呈减小趋势。作者

认为, 随着黏粒含量增多, 塑性指数由小增大, 黏聚力也不断增加, 当黏粒含量增加到一定程度, 黏聚力就不再增加, 随着黏粒含量的进一步增加, 黏聚力会相应减少, 这一方面由于过多的黏粒会吸收更多水分, 而过多的水分不利于黏聚力的产生, 另一方面过多的黏粒会使强度降低, 从而体现出黏聚力的下降。

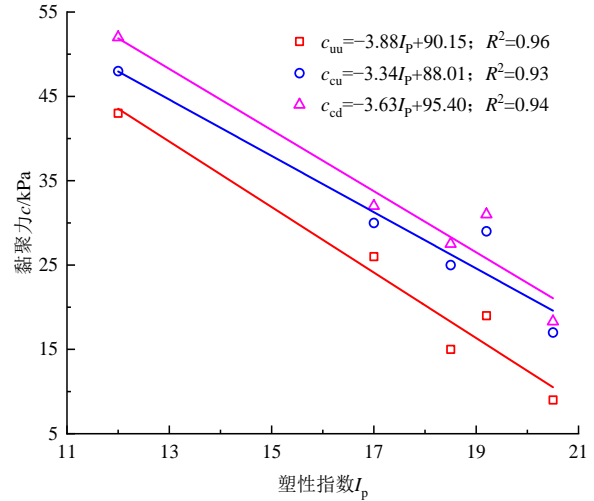


图 6 3 种黏聚力与塑性指数关系的对比图

Fig. 6 Comparison diagram of the relationship between three cohesive forces and  $I_p$

### (2) 黏聚力与含水率的关系

3 种试验对应的黏聚力都随着含水率的增大呈现下降趋势, 并且刚开始下降速率较快, 后期黏聚力随含水率下降不明显(图 7)。这与文献[20]所得含水率与固结快剪黏聚力的关系曲线类似。水在土颗粒表面形成水膜, 含水率增大, 水膜会相应增厚, 结合水减少, 逐渐转化为自由水, 使得黏聚力降低。

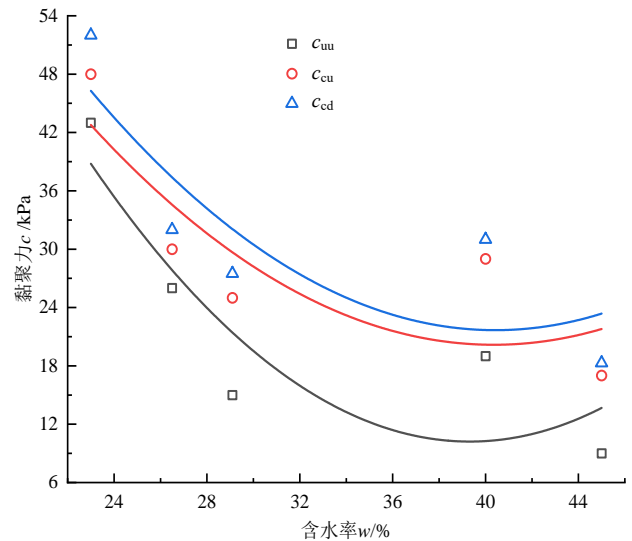


图 7 3 种黏聚力与含水率关系的对比图

Fig. 7 Comparison diagram of the relationship between three cohesive forces and  $w$

### 2.3 内摩擦角与塑性指数、天然含水率、液性指数的关系

#### (1) 内摩擦角与塑性指数的关系

由于 $\varphi_{uu}$ 理论上应为0,测得值也较小,此处不做探讨。随着塑性指数越大,土颗粒越小,土颗粒面相对光滑,咬合力降低,内摩擦角减小。内摩擦角整体趋势随着塑性指数增加而下降,呈线性负相关趋势,见图8,具体关系式见式(4)~(5)。其中固结排水的线性相关性比固结不排水的相关性好。CU条件下相关系数相对偏小, $c_{cu}$ 与塑性指数可能不是线性的关系,具体关系需要进一步的研究。对内摩擦角与塑性指数进行拟合,得:

CU条件下内摩擦角与塑性指数关系式:

$$\varphi_{cu} = -0.825I_p + 36.787 \quad (4)$$

CD条件下内摩擦角与塑性指数关系式:

$$\varphi_{cd} = -1.116I_p + 45.07 \quad (5)$$

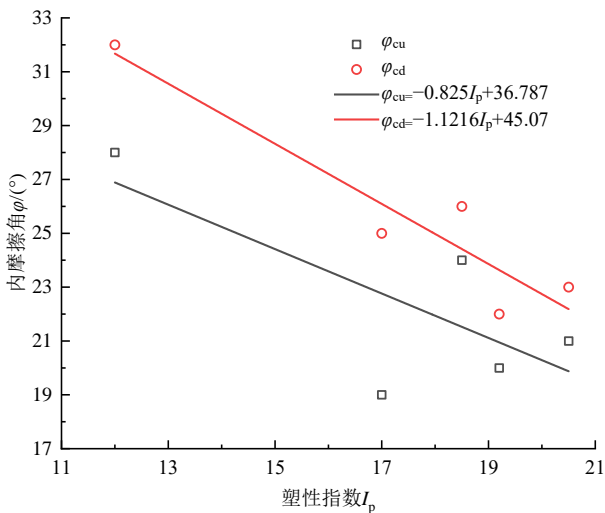


图8 内摩擦角与塑性指数关系  
Fig. 8 Relationship between  $\varphi$  and  $I_p$

卢肇钧<sup>[1]</sup>通过研究35种软土的固结直剪试验,得到软土内摩擦角和塑性指数的关系:当 $7 \leq I_p \leq 18$ 时, $\varphi = 43 - 0.92I_p$ ;当 $I_p > 18$ 时, $\varphi$ 在 $16^\circ \sim 26^\circ$ 范围内变化。对比发现,本文三轴压缩试验所得 $\varphi_{cu}$ 的变化幅度比卢肇钧<sup>[1]</sup>所得固结直剪试验的内摩擦角变化幅度略小, $\varphi_{cd}$ 的变化幅度比卢肇钧<sup>[1]</sup>所得变化幅度略大, $\varphi$ 值范围基本一致。

#### (2) 内摩擦角与含水率的关系

试验结果显示,内摩擦角是随着含水率上升呈下降趋势(图9)。含水率的增加提高了黏性土颗粒间的润滑效果,降低了颗粒之间的咬合力,使得内摩擦角减小。

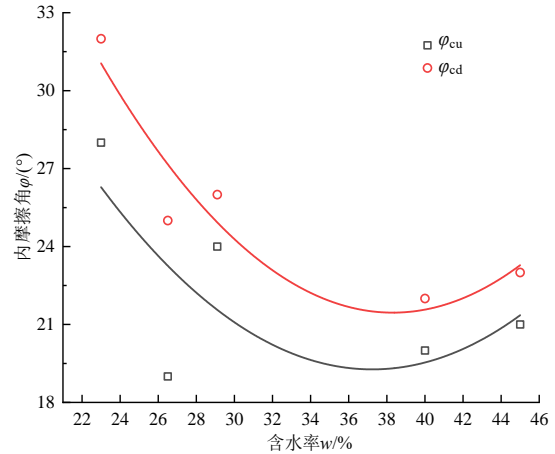


图9 内摩擦角与含水率关系  
Fig. 9 Relationship between  $\varphi$  and  $w$

#### (3) 内摩擦角与液性指数的关系

对内摩擦角与液性指数之间的关系用多项式拟合(图10),得:

$$\varphi_{cu} = -0.035I_L^2 - 2.56I_L + 67.24 \quad (6)$$

$$\varphi_{cd} = -0.041I_L^2 - 3.13I_L + 81.50 \quad (7)$$

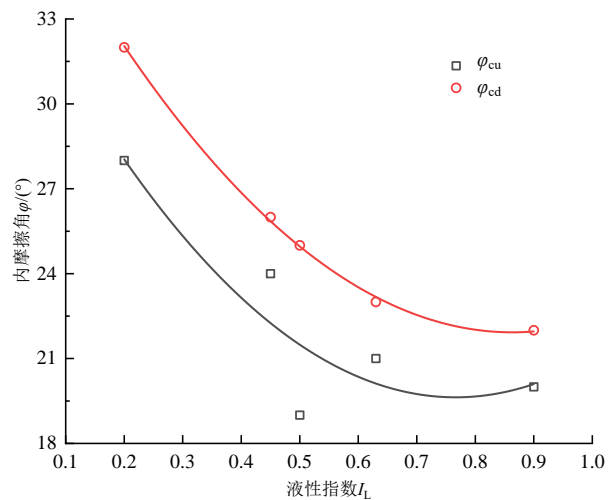


图10 内摩擦角与液性指数关系  
Fig. 10 Relationship between  $\varphi$  and  $I_L$

通过比较内摩擦角与液性指数、含水率、塑性指数的相关系数,发现内摩擦角与液性指数的相关系数较高,在液性指数0.2~1.0的范围内,土体处于可塑状态,内摩擦角随着液性指数的增大呈减小趋势。液性指数越大,表明土体含水率更接近液限,土颗粒的自由水含量占比越多,土颗粒之间的结合力越小,摩擦力也越小,内摩擦角也相应减小。

#### (4) 抗剪强度指标的对比分析

结合土体自身物理性质,研究3种抗剪强度之间的大小及转换关系。对3种强度指标的比值、差值与含水率、黏聚力以及塑性指数间的关系进行分

析比较。

a) 3 种黏聚力之间的关系

$c_{cu}/c_{uu}$  随着含水率、塑性指标的增加呈现增大趋势,  $c_{cd}/c_{uu}$  随含水率的增加而增大。说明含水率越大, 试验时黏性土在固结过程中排出水分越多, 土颗粒致密程度变化越大, 固结与否对黏聚力影响更为显著, 两者比值随之呈增大趋势 (图 11)。

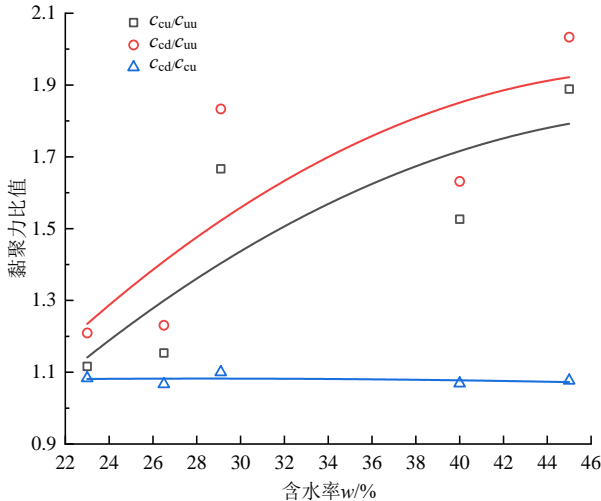


图 11 黏聚力比值与含水率的关系

Fig. 11 Relationship between cohesion ratio and w

$c_{cd}/c_{cu}$  比值在 1~1.1 之间, 差别不是很明显 (图 12), 通过分析两者的差值, 发现  $c_{cd}-c_{cu}$  在 1~4 kPa 范围内变化 (图 13), 且随着塑性指标的增大,  $c_{cd}-c_{cu}$  的差值减小, 且呈线性负增长,  $R^2=0.88$ , 黏聚力与塑性指数间存在较明显的线性关系, 差值也存在较好的线性关系, 进一步验证了两者具有较好的线性相关性。黏性土塑性指数越大, 细小黏性颗粒含量越多, 土体透水性越弱, 试验过程中排水与否对试验强度的影响也变弱, CD 与 CU 测得的黏聚力的差值就越小。

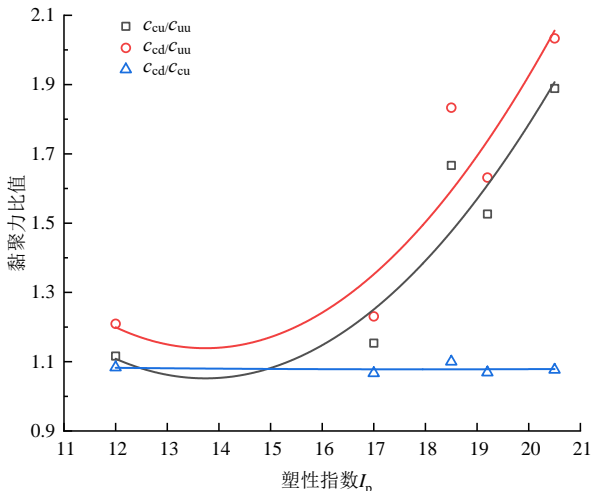


图 12 黏聚力比值与塑性指数的关系

Fig. 12 Relationship between cohesion ratio and  $I_p$

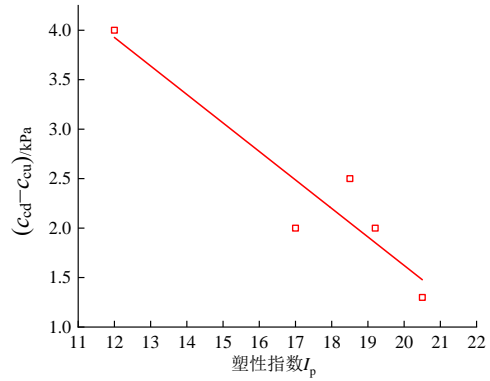


图 13  $c_{cd}-c_{cu}$  与  $I_p$  的关系

Fig. 13 Relationship between  $c_{cd}-c_{cu}$  and  $I_p$

b) 内摩擦角的比值与含水率、塑性指标的关系

因  $\varphi_{uu}$  接近于零值, 不参与比较, 在这有限的试样中, 内摩擦角的比值跟塑性指数、天然含水率、液性指数关系不明确, 见图 14~15, 未能找到  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  明显的规律, 但  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  值接近于 1。

比较两者差值,  $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$  的范围为  $2^\circ\sim 6^\circ$ , 其中  $I_p > 18$  时,  $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$  的值都为  $2^\circ$ , 相差较小。主要是随着黏粒含量的增加, 土体渗透性变弱, 固结排水试验过程中排水效果逐渐降低, 因此随着塑性指数增大,  $\varphi_{cd}$  与  $\varphi_{cu}$  值的大小越来越接近。

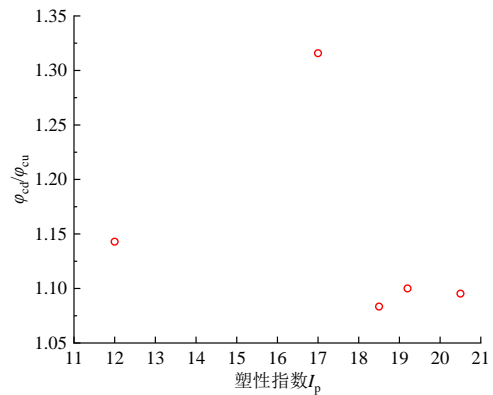


图 14  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  与  $I_p$  的关系

Fig. 14 Relationship between  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  and  $I_p$

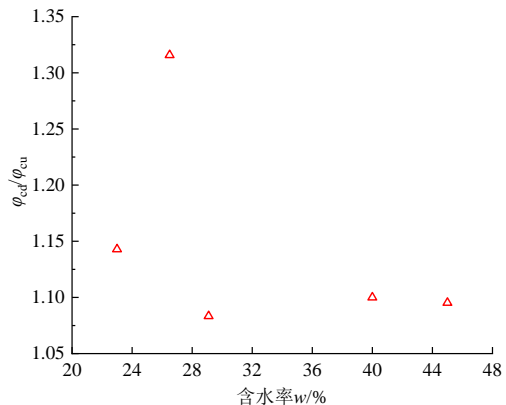


图 15  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  与含水率 w 的关系

Fig. 15 Relationship between  $\varphi_{cd}/\varphi_{cu}$  and w

### 3 结论

通过三轴压缩试验,发现黏聚力与塑性指数具有良好的线性负相关性,相关系数 $R^2$ 均在0.9以上;黏聚力随含水率增大而减小,减小趋势先快后慢,3种黏聚力大小关系为 $c_{cd} > c_{cu} > c_{uu}$ ;  $c_{cu}/c_{uu}$ 和 $c_{cd}/c_{uu}$ 随着含水率、塑性指数增加而增大。 $c_{cu}/c_{uu}$ 范围在1.1~1.9之间, $c_{cd}/c_{uu}$ 在1.2~2.0之间。 $c_{cd}-c_{cu}$ 在1~4 kPa之间,且随着塑性指数增大两者差值缩小。

内摩擦角大小关系为 $\varphi_{cd} > \varphi_{cu}$ ,内摩擦角与塑性指数、含水率的相关性表现不明显,与液性指数具有相对较好的负相关性, $R^2$ 在0.8以上。 $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$ 范围在 $2^\circ \sim 6^\circ$ 之间,差值随塑性指数增大而降低,当 $I_p > 18$ 时, $\varphi_{cd}-\varphi_{cu}$ 的值不再随塑性指数变化而变化。

由于试验条件的限制,仅取了有限土样,后续还需进一步研究,另外结果具有一定的地域性,其它地区土质是否有此关系需进一步验证。

### 参考文献

- [1] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 3-9.  
LU Zhao-jun. Problems on the research of shear strength of clayey soils[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 3-9.
- [2] 胡展飞, 傅艳蓉. 基于不同初始含水量的软粘土抗剪强度的试验研究[J]. 上海地质, 2001(1): 38-42.  
HU Zhan-fei, FU Yan-rong. Experimental study of the shear strength of soft soil with different initial water content[J]. Shanghai Geology, 2001(1): 38-42.
- [3] 顾成权, 孙艳. 土体内聚力随含水量、粘粒含量及干密度变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2005(1): 34-36.  
GU Cheng-quan, SUN Yan. Discussion on the cohesion of soil changing with water content, cohesive soil content and dry density[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(1): 34-36.
- [4] DOLINAR B. Predicting the normalized, undrained shear strength of saturated fine-grained soils using plasticity-value correlations[J]. Applied Clay Science, 2009, 47(3): 428-432.
- [5] NAGARAJ H B, SRIDHAHAN A, MALLIKARJUNA M H. Re-examination of undrained strength at Atterberg limits water contents[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30: 727-736.
- [6] 郑铁路, 朱剑锋, 刘干斌, 等. 宁波软土物理力学参数概率分布及相关性研究[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 367-373.  
ZHENG Yi-yi, ZHU Jian-feng, LIU Gan-bin, et al. Probability and correlation between physical and mechanical parameters of soft clays in Ningbo rail transit engineering[J]. China Sciencepaper, 2013, 8(5): 367-373.
- [7] 陈斌, 叶俊能, 朱剑锋, 等. 宁波轨道交通地基土体物理参数概率分布及相关性研究[J]. 工程力学, 2013, 30(增刊1): 200-205.  
CHEN Bin, YE Jun-neng, ZHU Jian-feng, et al. Study on the probability and correlativity among physical parameters of foundation soil in Ningbo rail transit engineering[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(S1): 200-205.
- [8] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53-59, 97.  
XING Xian-li, LI Tong-lu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 53-59, 97.
- [9] 赵蕊, 左双英, 王嵩, 等. 不同含水量贵阳重塑红粘土三轴抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 90-95.  
ZHAO Rui, ZUO Shuang-ying, WANG Song, et al. Experiment and mechanism analysis of water contents on triaxial shear strength of the remodeled red clay of Guiyang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 90-95.
- [10] 滕延京, 盛志强, 王曙光. 饱和黏性土抗剪强度的试验方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 426-431.  
TENG Yan-jing, SHENG Zhi-qiang, WANG Shu-guang. Test method for shear strength of saturated cohesive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 426-431.
- [11] 赵晶, 蒋良淮, 罗强, 等. 土体强度参数变异水平及影响因素关联分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 592-601.  
ZHAO Jing, JIANG Liang-wei, LUO Qiang, et al. Correlative analysis between variation level of soil strength parameters and influencing factors[J]. Journal of

- Engineering Geology, 2018, 26(3): 592-601.
- [12] SPAGNOLI G, FEINENDEGEN M. Relationship between measured plastic limit and plastic limit estimated from undrained shear strength, water content ratio and liquidity index[J]. Clay Minerals, 2017, 52(4): 509-519.
- [13] 唐军平, 何国东, 付旭, 等. 佛山地基软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊 2): 645-653, 659.
- TANG Jun-ping, HE Guo-dong, FU Xu, et al. Study on the relevance between the physico-mechanical parameters of foundation soft clay of Foshan[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 645-653, 659.
- [14] 郭林坪, 穆坤, 杨爱武, 等. 天津滨海新区粘性土物理力学性质指标相关性[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 452-457.
- GUO Lin-ping, MU Kun, YANG Ai-wu, et al. Correlation analysis on physico-mechanical properties of clayey soil in Binhai new area in Tianjin[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 452-457.
- [15] 李旭昶, 孙德安, 徐永福. 扬州土物理与力学性质指标的相关性分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 333-340.
- LI Xu-chang, SUN De-an, XU Yong-fu. Study on correlations of physical and mechanical property indexes of Yangzhou clays[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 333-340.
- [16] 张崇磊, 朱秦, 李丞, 等. 中等压缩性粉质黏土不排水剪切强度试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1620-1629.
- ZHANG Chong-lei, ZHU Qin, LI Cheng, et al. Experimental study on undrained shear strength of medium-compressibility silty clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1620-1629.
- [17] SHIMOBÉ S, SPAGNOLI G. Relationships between undrained shear strength, liquidity index, and water content ratio of clays[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(9): 4817-4828.
- [18] 乔峰, 薄景山, 常晁瑜, 等. 3 种特殊土物理力学性质指标统计分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2021, 51(5): 1356-1365.
- QIAO Feng, BO Jing-shan, CHANG Chao-yu, et al. Statistical analysis of physical and mechanical properties of three special soils[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2021, 51(5): 1356-1365.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007 — 2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [20] 徐洋, 吕坚, 姚宁, 等. 宁波软土物理力学指标相关性研究[J]. 路基工程, 2021(3): 40-43.
- XU Yang, LYU Jian, YAO Ning, et al. Correlation analysis of physical and mechanical index of soft soil in Ningbo[J]. Subgrade Engineering, 2021(3): 40-43.