

土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响

陈红星, 李法虎^{*}, 郝仕玲, 张心平

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 土壤含水率和土壤碱度是表征土壤物理化学性质的两个重要参数。通过室内三轴不固结不排水试验, 研究了土壤含水率和土壤碱度对土壤抗剪强度的影响。试验处理采用 5 种土壤碱度(土壤可交换钠百分比 $ESP = 0.5, 10, 20, 40$) 和 4 种土壤质量含水率(0.05、0.10、0.20 以及饱和含水率 0.34) 水平。试验结果显示, 土壤黏聚力随着土壤含水率的增加基本上呈先增大后减小之趋势; 当土壤含水率在 0.10 附近时黏聚力达到其最大值。土壤内摩擦角随着土壤含水率的增加而线性减小。土壤碱度对土壤黏聚力的影响机理较为复杂, 其影响效果随土壤含水率的增加而减小; 但土壤碱度对土壤内摩擦角的影响较小。土壤碱度对土壤抗剪强度的影响程度明显地小于土壤含水率对其的影响程度。

关键词: 土壤含水率; 土壤碱度; 土壤抗剪强度; 抗剪强度指标

中图分类号: S152.7; TU432

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)2-0021-05

陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 21-25.

Chen Hongxing, Li Fahu, Hao Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 21-25. (in Chinese with English abstract)

0 引言

碱性土壤在世界范围内广泛存在。中国碱性土壤的耕地面积大约为 43.7 万 hm^2 ^[1]。由于可交换性 Na^+ 在土壤胶体中的过量累积, 碱性土壤一般具有较高的 pH 值以及不良的土壤结构。碱性土壤易结皮, 水力特性较差, 通透性不良, 且较易发生水土流失现象^[2]。此外, 在碱土中, 许多营养元素的缺乏以及作物营养的严重失衡现象也经常发生^[3,4]。因此, 碱性土壤的管理以及对水土环境的影响越来越受到人们的重视。

土壤碱度是碱性土壤的一个重要指标, 它一般以土壤可交换钠百分比 (ESP) 表示。此外, 土壤碱度也可以用土壤溶液的 pH 值或钠吸附比 (SAR) 等指标来表征。土壤 ESP 和土壤溶液 SAR 之间存在着定量关系^[4]。大量的研究结果显示^[5], 当土壤溶液的电解质浓度低于土壤黏粒的凝絮浓度时, 土壤黏粒就会发生弥散现象, 且其弥散程度随着土壤 ESP 或土壤溶液 SAR 的增加而增大。弥散的黏土颗粒在水流运动(例如灌溉或降雨)的作用下堵塞土壤的传导孔隙, 从而增大了土壤容重和表层土壤的抗剪强度^[6], 这可能是干旱区碱地土

壤表层硬壳形成和作物出苗困难的主要原因之一。然而, 由于土壤团聚体的稳定性随着土壤 ESP 或土壤溶液 SAR 的增大而降低^[7], 因此土壤碱度本身也可能会引起土壤抗剪强度的改变。以往的研究主要集中在土壤碱度以及土壤溶液电解质浓度对土壤入渗性能和传导性能的影响^[8], 而较少研究土壤碱度和土壤含水率变化对碱性土壤抗剪强度的影响。已有的试验结果显示^[9,10], 土壤含水率影响土壤的抗剪强度。土壤抗剪强度与土壤的水蚀强度、土壤的可耕性以及建筑物地基的承载力等问题密切相关。正确认识土壤含水率以及土壤碱度对土壤抗剪强度的影响, 对碱性土壤的合理利用以及水土环境保护有着非常重要的指导作用。

本文通过室内三轴剪切试验, 测定了土壤含水率以及土壤碱度对土壤抗剪强度指标的影响, 为碱性土壤的管理和利用以及水土环境的保护提供了一定的理论依据。

1 试验方法和材料

1.1 试验土壤

试验土壤取自北京通州区永乐店耕作农田的表层 (0~30 cm) 土壤。土壤为重粉质壤土, 其机械组成为砂粒 36.08%、粉粒 53.61% 和黏粒 10.31%。黏土矿物主要为伊利石和蒙脱石, 它们占黏土矿物总量的 80% (PW1710X-Diffractometer 射线衍射仪, Phillip, 荷兰), 其次为高岭石 (11%) 和绿泥石 (9%)。

1.2 土样准备

将大田中收集的土壤分成 5 份, 分别在一定的

收稿日期: 2006-04-21 修订日期: 2006-12-27

基金项目: 农业部农业生态环境科技项目和中国农业大学精品课程建设项目

作者简介: 陈红星 (1983-), 女, 主要从事农业水土工程的研究。北京海淀区清华东路 17 号 中国农业大学 295 信箱, 100083

^{*}通讯作者: 李法虎, 北京海淀区清华东路 17 号 中国农业大学 295 信箱, 100083。Email: lifahu@cau.edu.cn

SAR 条件下以 500、100 和 10 mmol/L 三种不同电解质浓度的淋洗液相继淋洗。待淋出液的电导率 (EC) 和离子组成趋于稳定后, 将淋洗液浓度改变为 SAR 相同的低一级浓度的淋洗液继续淋洗, 直至所有三种浓度的淋洗液全部淋洗完毕以后停止淋洗。将淋洗处理后的土壤在 105℃ 的烘箱中烘干并过筛 (2 mm) 后待用。按照此程序即可制备具有不同碱度的土样。淋洗液的设计 SAR 值分别为 0.5、10、20 和 40 (mmol/L)^{0.5}。

淋洗液由去离子水以及 NaCl 和 CaCl₂ · 2H₂O (试剂级) 配制。配制淋洗液所需的 NaCl 和 CaCl₂ · 2H₂O 质量可由方程式 (1) 和式 (2) 联立求解得出

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+}]}/2} \quad (1)$$

$$C = [Ca^{2+} + Na^+] \quad (2)$$

式中 SAR——淋洗液的钠吸附比, (mmol/L)^{0.5}; [Na⁺]——Na⁺ 浓度, mmol/L; [Ca²⁺]——Ca²⁺ 浓度, mmol/L; C——淋洗液电解质浓度, mmol/L。

1.3 试验仪器和试验处理

当土壤 ESP 较低时, 可以认为经上述各种 SAR 淋洗液淋洗完成后的土壤 ESP 值近似等于 0.5、10、20 和 40^[1]。为方便起见, 文中将不同 SAR 淋洗液淋洗平衡处理后的土样以其所对应的土壤 ESP 称之。

土样试件的准备和剪切试验程序按照中国《土工试验规程》进行^[11]。试验处理为 5 个土壤碱度 (ESP = 0、5、10、20、40) 和 4 个土壤质量含水率 (0.05、0.10、0.20 和饱和含水率 0.34), 设计干容重为 1.4 g/cm³。对准备好的各种碱度的土样, 按照设计的含水率计算需水量 (去离子水), 然后均匀喷洒于土样上, 充分拌匀后装入盛土容器中焖盖一昼夜, 从而配制成不同含水率的散状土样。土壤含水率以制备剪切试件前松散土样的实测值为准。根据土壤含水率以及设计的土壤干容重, 按照计算结果称取一定质量的土样, 分层均匀地装入制样器内击实, 从而制成供试验用的三轴剪切试件。饱和试件则是根据设计的干容重分层均匀装填击实土样后, 将试件放置在真空皿内进行饱和。三轴剪切试件的高度为 8 cm, 直径为 3.91 cm。

本研究采用 SJ-1A 型三轴剪切仪 (南京电力自动化设备总厂) 进行不固结不排水剪切试验。试验过程中径向荷载 (围压) σ_3 设置 4 个等级, 分别为 50、100、150 和 200 kPa。每种处理进行 2 次重复。

2 试验结果与讨论

2.1 试验数据处理

在各级径向围压 σ_3 作用下, 连续分级增加竖向压

应力 $\Delta\sigma_1$, 直至压力室内的试件破坏为止。试件受到的大主应力 $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_1$, 而 $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$ 即称为偏差应力。根据量力环的读数, 测读每级压力作用下的竖向变形量, 计算竖向应变, 从而绘制出各种径向荷载条件下的应力-应变关系曲线。由于目前在理论及应用上对非饱和条件下土体抗剪强度的有效应力法表达仍存在一定的困难, 因此本研究采用总应力法表示土体的抗剪强度, 并且将土的抗剪强度指标-黏聚力 (c) 和内摩擦角 (φ) 看作变量。图 1 显示了当土壤试样含水率 ω 为 0.052、土壤 ESP 为 40 时的轴向偏差应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 与轴向应变之间的关系曲线。其他各处理条件下的轴向偏差应力与轴向应变之间的关系曲线与此相似, 文中不再一一列出。

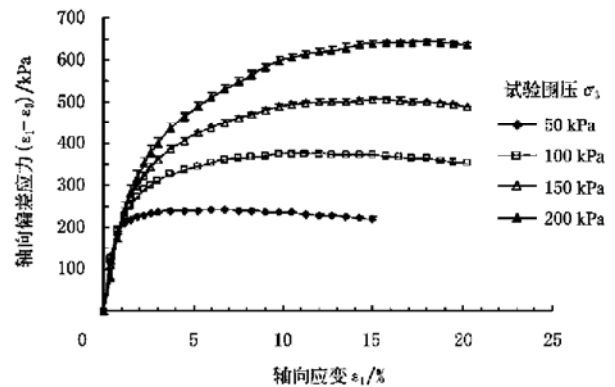


图 1 当土壤试样含水率为 0.052、土壤 ESP 为 40 时轴向偏差应力与轴向应变之间的关系曲线

Fig. 1 Relationship between axial deviatoric stress and axial strain at soil water content of 0.052 and soil ESP of 40

在剪切试验开始时, 试件所受到的轴向偏差应力迅速增加 (图 1); 当轴向偏差应力达到一定程度后, 试件所受到的轴向偏差应力随着轴向应变的变化速率迅速减小并逐渐趋于稳定或达到其峰值强度。通常取应力-应变关系曲线的峰值强度或者应变值达到 15% 时的偏差应力作为土体破坏时的偏差应力值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。由图 1 所示的应力-应变关系曲线, 可以确定出试件破坏时土体的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。根据各级围压 σ_3 和相应的破坏时最大主应力值 $\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 绘制出试件破坏时的摩尔圆以及抗剪强度包线 (图 2), 从而求得试验土样的抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的值。

由图 2 可求得当土壤含水率为 0.052、ESP 为 40 时, 试验土样的黏聚力 c 为 27.79 kPa, 内摩擦角 φ 为 35°。图 2 的结果显示, 非饱和土体的抗剪强度包线为一斜直线, 这与其他学者的试验结果相同^[12-14]。非饱和土体中气体的压缩量随着围压的增加而增大, 从而导致土

体的密度随之增大。因此, 虽然本研究采用不固结不排水剪切试验, 但非饱和土体的内摩擦角 φ 并不等于零。

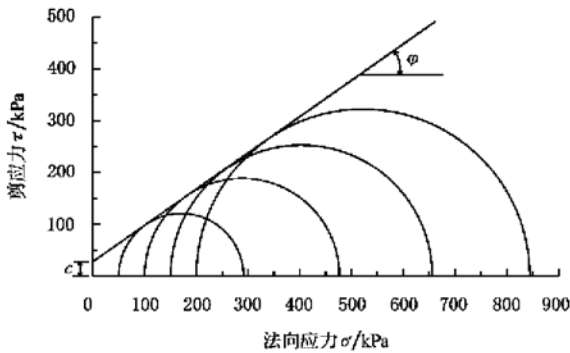


图 2 当土壤含水率为 0.052、土壤 ESP 为 40 时的抗剪强度包线

Fig. 2 Envelope of soil shearing strength at soil water content of 0.052 and soil ESP of 40

2.2 土壤含水率对抗剪强度指标的影响

按上述方法求出所有试验处理条件下的土壤黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值。各种土壤碱度条件下土壤黏聚力和内摩擦角随土壤含水率的变化分别见图 3 和图 4。

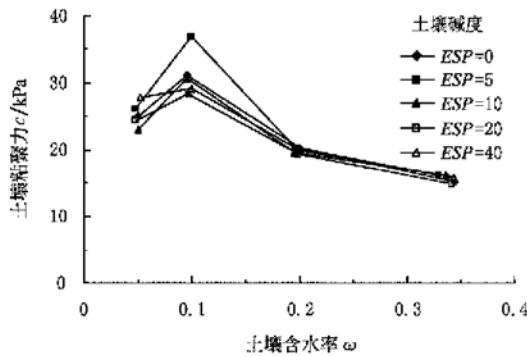


图 3 不同土壤 ESP 条件下土壤黏聚力随土壤含水率的变化

Fig. 3 Changes of soil cohesive force with soil water content at different soil ESP

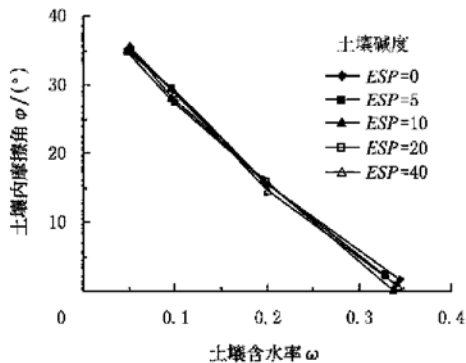


图 4 不同土壤 ESP 条件下土壤内摩擦角随土壤含水率的变化

Fig. 4 Changes of soil internal frictional angle with soil water content at different soil ESP

图 3 的试验结果显示, 土壤黏聚力随着土壤含水率的增加基本呈先增大后减小之趋势, 在土壤含水率为 0.10 左右时土壤黏聚力达到其最大值。土壤内摩擦角 φ 随着土壤含水率 ω 的增加近似呈线性减小(图 4)。在不考虑碱度水平的影响时, $\varphi = -117.2 \times \omega + 40.29, R^2 = 0.994^*$ 。土壤黏聚力和土壤内摩擦角随土壤含水率的变化趋势与 Cokca 等利用直接剪切试验得出的结果一致^[15]。图 4 的结果也显示, 当土体饱和时, 土壤的内摩擦角 φ 相当小($0.19^\circ \sim 2.23^\circ$, 平均 1.15°), 即土的抗剪强度包线近似为一条水平线。这与饱和土体不固结不排水试验条件下抗剪强度包线的理论 φ 值应等于零的结论基本一致。本试验中饱和土壤的内摩擦角 φ 不等于零这一结果可能是由于土样未充分饱和和所致。

土的抗剪强度 $\tau = c + \sigma \times \tan \varphi$ (式中 σ 为剪切破坏面上的法向应力), 它由黏聚强度和摩擦强度两部分组成。摩擦强度主要与土颗粒之间的滑动摩擦和咬合摩擦有关, 土的内摩擦角是其表征参数。土壤黏聚力除与库仑力、范德华力、胶结作用力以及由浓度差所引起的渗透压力等有关外, 它还受水膜黏结力的影响。当土壤含水率较低时, 土壤黏聚力主要通过水膜黏结力的大小影响土壤的力学性质^[16]。此时虽然土颗粒周围的分子膜引力较大但水分子数量较少, 对土粒的牵引作用并非很强; 随着水分子数量的增多, 牵引作用逐渐增强^[9], 这可能是本试验中当土壤含水率较低时土壤黏聚力随含水率增加而增大的主要原因。但当土壤含水率增大到一定程度(约 0.10 左右)后, 由于土颗粒周围的水膜厚度增大, 水膜对土颗粒的黏结力减小, 土颗粒之间的相互移动较为容易, 摩擦力降低。此外, 当土壤含水率增大时, 水分对胶结物质会产生一种楔入作用, 从而导致土颗粒之间更易于滑动^[17]; 并且水分还可以使某些起胶结作用的盐类溶解或使某些胶结物软化, 引起土壤胶结物质破坏, 从而导致土壤抗剪强度的降低。

2.3 土壤碱度对抗剪强度指标的影响

试验结果显示, 土壤碱度对试验土壤的内摩擦角的影响非常小(图 4)。土的内摩擦角主要与土颗粒周围的水膜厚度即土壤含水率有关。在不同土壤含水率条件下, 土壤黏聚力随土壤碱度的变化趋势见图 5。

图 5 的试验数据显示, 在土壤含水率一定的条件下, 土壤黏聚力基本上随着土壤碱度的增加基本上呈先增大后减小然后再继续增大之趋势。土壤黏聚力一般在土壤 $ESP = 5$ 时达到其最大值, 而在 $ESP = 10$ 或 20 时达其最小值。当土壤含水率较低($\omega < 0.20$) 时, 土壤黏聚力随土壤 ESP 的变化相对较大; 而当含水率较高时, 其变化程度较小。比较图 3 和图 5 可以发现, 土壤碱度对土壤黏聚力的影响程度明显地小于土壤含水率对其

的影响程度。

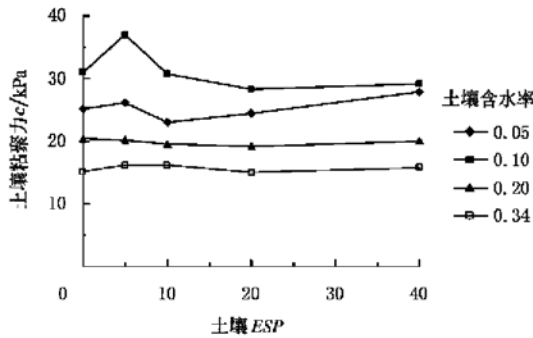


图 5 不同含水率条件下土壤黏聚力随土壤 ESP 的变化

Fig. 5 Changes of soil cohesive force with soil ESP at different water content

土壤溶液的化学组成或土壤中可交换 Na^+ 的相对含量对土壤团聚体的性质有重要的影响^[5]。黏粒表面电荷与土壤溶液中的反电荷形成扩散双电层 (DDL)。当黏土颗粒相互接近到一定距离时, 扩散双电层相互重叠, 粒子间产生静电排斥力, 从而阻止了黏土颗粒的进一步靠近。黏粒间的排斥力随着反离子离子价的降低而增大^[5]。随着土壤胶体上交换性 Na^+ 相对含量即土壤 ESP 的增加, 土壤的碱度越大, 而高价离子的相对含量及其饱和度越小。土壤 ESP 的增加将使胶体扩散双电层的厚度和电动电位增大^[18], 从而引起土壤黏粒分散性的增加和土壤团聚体稳定性的降低。因此, 当土壤 $\text{ESP} \geq 5$ 时, 土壤黏聚力随着 ESP 的增加而降低。但随着土壤 ESP 的继续增加, 弥散的土壤黏粒在轴向应力作用下更易发生位移, 充填土壤孔隙, 从而导致土壤容重和土壤黏聚力的增大。而当土壤 ESP 较小 (< 5) 时, 土壤黏聚力随 ESP 增加而增大的机理可能与 Ca^{2+} 和 Na^+ 的水合半径有关。 Na^+ 的水合半径比 Ca^{2+} 的约小 30% 左右^[19], 因此它对水分子具有更大的吸引力和较薄的吸附水膜厚度, 从而增大了土体的黏聚力。土壤中的水分状况影响土壤黏聚力对土壤 ESP 的反映程度。当土壤含水率较高 ($\omega \geq 0.20$) 时, 土壤水分对土壤黏聚力的影响效应远大于土壤 ESP 对其的影响, 从而导致此时土壤黏聚力随土壤 ESP 的变化程度较小 (图 5)。总之, 土壤碱度对土壤抗剪强度的影响, 既与土壤化学性质以及由化学性质变化而引起的土壤物理性质的改变有关, 同时也与土壤的水分状况有关。

3 结 论

通过对不同含水率和不同碱度土壤的不固结不排水剪切试验, 本研究得到以下的一些基本结论:

1) 非饱和土体的抗剪强度包线为一直线, 它随着

破坏面上法向应力的增加而增大; 饱和土体的抗剪强度包线近似为一水平线, 这与饱和土体的摩尔-库伦破坏理论 ($\varphi = 0$) 一致。

2) 土壤抗剪强度与土壤含水率密切相关。试验土壤的黏聚力随着土壤含水率的增加先增大后减小, 在含水率为 0.10 左右时达其最大值。试验土壤的内摩擦角随着含水率的增加而减小; 当土体趋于饱和时, 内摩擦角趋于零 ($\varphi = 0.19^\circ \sim 2.23^\circ$)。

3) 土壤水化学性质影响化学作用力以及土壤的微观结构, 进而引起土壤力学性质的变化。当土壤 ESP 较小 (≤ 5) 时, 土壤黏聚力随着土壤碱度的增加而增大; 当土壤 $\text{ESP} > 5$, 土壤黏聚力随着土壤碱度的增加先减小而后又稍微增大。较高的土壤含水率 (≥ 0.20) 降低了土壤碱度对土壤黏聚力的影响效应。在试验条件下, 土壤碱度对土壤内摩擦角的影响较小。

4) 土壤碱度对土壤抗剪强度指标的影响程度明显地小于土壤含水率对其的影响程度。

土壤碱度对土壤抗剪强度的影响仍需从土壤颗粒表面的化学作用力以及土壤结构的微观形态上进行更加深入的研究, 以便进一步揭示其影响机理, 从而指导人们对碱性土壤的合理开发利用及管理。

[参 考 文 献]

- [1] Levy G. Sodcity. In Summer M (ed.) Handbook of soil science[M]. USA: CRC Press LLC, 1999. G27- 60.
- [2] Guarnieri A, Fabbri A, Molari G. Influence of sodicity and salinity on the mechanical properties of two Italian soils[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(2): 239- 243.
- [3] Naidu R, Rengasamy P. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, 31: 801- 819.
- [4] Qadir M, Schubert S. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils[J]. Land Degradation & Development, 2002, 13: 275- 294.
- [5] 李法虎, 郭锦蓉. 土壤水蚀中化学因素的研究现状和展望[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 32- 37.
- [6] Rycroft D W, Kyei-Baffour N, Tanton T. The effect of sodicity on the strength of a soil surface[J]. Irrig. and Drain. 2002, 51: 339- 346
- [7] Hasan R, Ebrahim P, Fuad T. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates [J]. Soil & Tillage Research, 2000, 54: 145- 153.
- [8] Shainberg I, Letey J. Response of soils to sodic and saline conditions[J]. Hilgardia, 1984, 52(2): 1- 55.
- [9] 赵晓光, 石 辉. 水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 12- 15.
- [10] 李兆平, 张 弥, 赵慧丽. 含水量的变化对非饱和土强度影响的试验研究[J]. 西部探矿工程, 2001, 4: 1- 3.

- [11] 中华人民共和国水利电力部. 土工试验规程 SDS01-79 [M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [12] Zhang B, Zhao Q G, Horn R, et al. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 59: 97-106.
- [13] Wulfsohn D, Adams B A, Fredlund D G. Triaxial testing of unsaturated agricultural soils [J]. *J. Agric. Engng Res.* 1998, 69: 317-330.
- [14] Eko R M. Use of triaxial stress state framework to evaluate the mechanical behaviour of an agricultural clay soil [J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81: 71-85.
- [15] Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2004, 22: 285-297.
- [16] 王 为, 李小昱, 王转卫. 农业土壤抗剪强度的试验研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(1): 125-127.
- [17] 刘 洋, 王国强, 周 健. 增湿条件下合肥膨胀土的强度特性[J]. *勘察科学技术*, 2004, 6: 17-19.
- [18] 李小刚, 曹 靖, 李凤民, 等. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(1): 64-72.
- [19] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength

Chen Hongxing, Li Fahu^{*}, Hao Shiling, Zhang Xinping

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil water content and soil sodicity are two important parameters of soil physical and chemical characteristics. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength were carried out in laboratory by triaxial shearing test under unconsolidated-undrained conditions. Five soil exchangeable sodium percentages (*ESP*) of 0, 5, 10, 20, 40 and four soil water contents (*w/w*) of 0.05, 0.10, 0.20, 0.34 (saturated) were tested. Experimental data indicate that soil cohesive force firstly increases and then decreases with the increase of soil water content, and it reaches to the maximum at the water content of about 0.10. Soil internal frictional angle decreases linearly with the increase of soil water content. The influence mechanism of soil *ESP* on soil cohesive force is complicated and its effect decreases with the increase of soil water content. The soil *ESP* influence on soil internal frictional angle is small. The effect of soil water content on soil shearing strength is much greater than that of soil sodicity.

Key words: soil water content; soil sodicity; soil shearing strength; shearing strength parameter