

重塑黏土圆锥指数和抗剪强度的关系

冯晓斌, 丁启朔^{*}, 丁为民, 姬长英, 王迪

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为了定量评价轮式车辆在软黏土条件的附着、牵引及通过性能并建立软黏土的圆锥指数与抗剪强度关系, 采用非标准普式击实法制备黏土试样, 分别通过微型贯入试验与直剪试验得到重塑黏土的圆锥指数与抗剪强度, 发现 23% 含水率是二者变化趋势的分界点, 重塑土样的含水率低于该值时其圆锥指数与抗剪强度都随含水率呈二次多项式关系变化, 而在高于该临界含水率时二者都随含水率呈线性关系变化。同样, 在 23% 含水率以下圆锥指数与抗剪强度线性相关, 而当含水率高于临界点后该线性关系消失。抛开含水率变化的影响, 临界含水率以下的重塑样圆锥指数与抗剪强度关系仍然总体呈线性相关关系。

关键词: 土壤力学, 黏土, 抗剪强度, 黏附, 圆锥指数, 车辆通过性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.024

中图分类号: U461.5⁺⁴

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0146-05

冯晓斌, 丁启朔, 丁为民, 等. 重塑黏土圆锥指数和抗剪强度的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 146-150.

Feng Xiaobin, Ding Qishuo, Ding Weimin, et al. Relationship between cone index and shear strength of remolded clayey soil[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 146-150. (in Chinese with English abstract)

0 引言

20 世纪 80 年代已经有人提出微型圆锥在土力学方面的应用^[1], 特别是微型圆锥在研究作物生长机械阻力^[2-3], 土壤内部细微结构及土壤强度的测定^[4-6]等领域的应用十分广泛。随着生产需求, 圆锥指数逐渐用于精确农业^[7]。圆锥指数也用来评价车辆通过性, Jody 等^[8]人与日本的田忠孝^[9]采用 WES (waterways experiment station) 方法对车辆通过性进行研究。刘大维等^[10]人对大庆沼泽地进行圆锥指数原位测试, 定性说明土壤圆锥指数与车辆通过性的关系。鉴于圆锥指数的重要性以及应用的广泛性, 国内有学者提出建议采用圆锥指数 CI (cone index) 作为中国当前的统一土壤力学参数标准^[11]。

软黏土条件下, 土壤能提供给车辆的最大推力是影响车辆通过性的重要因素, 而最大推力由嵌入轮胎花纹土壤的抗剪强度决定^[12]。因此, 有学者用土壤的抗剪强度来预测土壤所能提供给轮胎的推力^[13-14], 并建立了相关的预测模型。但是土壤抗剪强度的确定多属于室内试验测定, 其室外原位测试在准确性、适用性及普遍性等方面受到一定局限。土壤的抗剪强度与圆锥指数都是通过表征土壤的机械特性来评价车辆通过性。从理论上讲, 通过前者更能较准确计算出车轮所受到的切线牵引力, 即土壤推力; 但是后者的适用性与便捷性优于前者。有

学者指出这 2 个参数的获取方法不同, 而且所表示的物理意义也有所区别^[6], 但秦植海^[15]通过大量的室内微型贯入试验与剪切试验发现贯入力与抗剪强度之间存在一定的关系。尽管如此, 一方面由于土壤类型的多样性从而会造成试验土壤的承载力及抗剪强度的表现会有所不同, 另一方面围绕车辆通过性等的基础试验数据依然偏少, 因此, 提供与车辆行驶性能相关的准确物理模型依然需要丰富的试验数据。

本文针对中国分布广泛的黄土质土壤, 进行系统的微型贯入试验与直剪试验, 以建立其抗剪强度与圆锥指数的关系模型, 进而分析这 2 个参数与含水率、击实功之间的关系。不仅为圆锥指数在农业领域的进一步应用而且为其预测或评价车辆在软地面的通过性提供理论依据。

1 材料和方法

试验用土土质为黄棕壤, 物理及化学成分见表 1。

表 1 试验用土的物理化学组成
Table 1 Soil physical and chemical composition

黏粒 ($<2\ \mu\text{m}$)/%	壤粒 ($2\sim 50\ \mu\text{m}$)/%	沙粒 ($>50\ \mu\text{m}$)/%	有机质 质量分数/%	pH 值
24	26	50	2.90	7.78

将取回的土壤经过风干、破碎、过孔径为 4 mm 的筛子, 测取土壤含水率, 再根据击实试验要求采用喷雾法按 2% 级差调配不同的含水率, 调配后土壤的含水率分别为 9%、11%、13%、15%、17%、19%、21%、23%、25%、27%、29%、31%。参照汪攀峰等人^[16]的试验, 采用非标准击实法制备试样, 击实筒如图 1 所示。

由不同的击实行程来确定不同的击实功, 选取 5 个击实行程分别为: 100、200、300、400、500 mm。表 2 是不同击实行程对应的击实功 (轻型标准击实试验击实

收稿日期: 2010-03-20 修订日期: 2010-12-07

基金项目: 国家自然科学基金 (50875131); 国创基金 (101030738); 中国博士后特别基金 (200902521); 江苏省博士后基金 (0802015B)

作者简介: 冯晓斌 (1985-), 男, 陕西渭南人, 主要从事土壤力学性质的研究。南京 南京农业大学工学院, 210031

*通信作者: 丁启朔, 教授, 研究方向为土壤耕作力学。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: qsding@njau.edu.cn

功为：592.2 kJ/m³)。

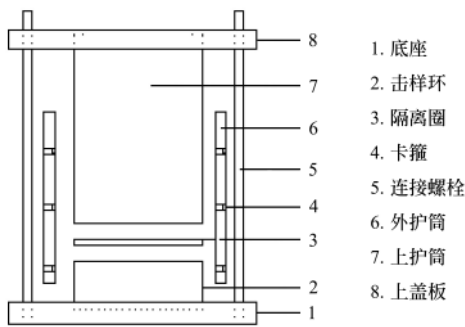


图 1 击实筒结构示意图

Fig.1 Schematic illustration for the construction of non-standard proctor mold

表 2 五种击实行程对应的击实功

Table 2 Compacting work for the five displacements

行程/cm	单位击实功/(kJ·m ⁻³)
10	197.89
20	395.79
30	593.68
40	791.58
50	989.47

1.1 微型贯入试验

微型贯入试验在自行设计的微型贯入仪(如图 2)上进行,试样与图 1 中的击样环尺寸一致,直径为 75 mm,高度 40 mm。贯入试验使用的探针材料为普通碳钢,探针直径 2 mm,端部打磨成锥形,锥角 60°。参照 Karunatilake^[5]的试验,本试验探针贯入速率为 30 mm/min,贯入深度为 30 mm。

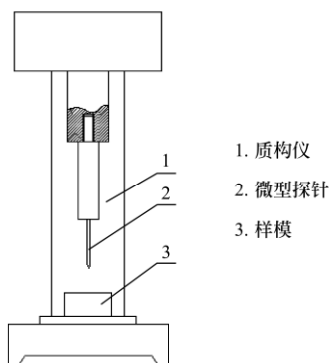


图 2 微型贯入仪结构示意图

Fig.2 Schematic of micro-penetrometer

1.2 直剪试验

本试验使用的直剪仪为南京土壤仪器厂的 SDJ-1 型三速电动等应变直剪仪,直剪仪示意图如图 3 所示。

将图 1 中的击样环分为高度为 20 mm 的两部分,中间用垫圈隔开。击实后,用环刀从下面部分取出剪切样,试样直径为 61.8 mm,高度为 20 mm。试验中按照土工试验标准使用有侧限快剪法测试,以位移控制方式进行,最大剪切位移设定为 4 mm。施加 4 个法向压力,分别为 100、200、300 和 400 kPa。

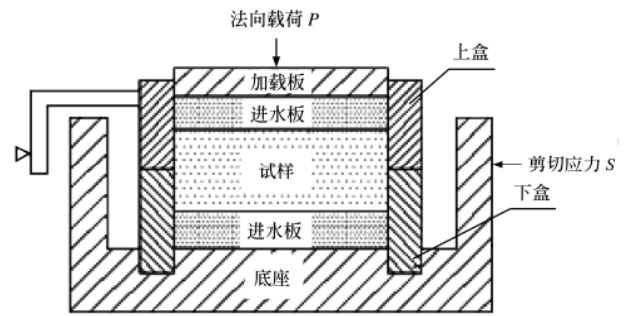


图 3 直剪仪示意图

Fig.3 Schematic of the direct shear apparatus

在直剪试验中按下式计算剪应力

$$\tau = C \cdot R$$

式中, τ 为试样所受的剪应力, kPa; C 为测力环系数(测力环系数为 1.923), kPa/0.01 mm; R 为测力计读数, 0.01 mm。

2 结果与分析

2.1 圆锥指数与击实行程、土壤含水率之间的关系

采用微型贯入仪对重塑土壤进行圆锥贯入试验,获取贯入过程的阻力-位移曲线。以 15% 含水率、300 mm 击实行程的土样为例,其贯入阻力与位移关系的原始曲线如图 4 所示。

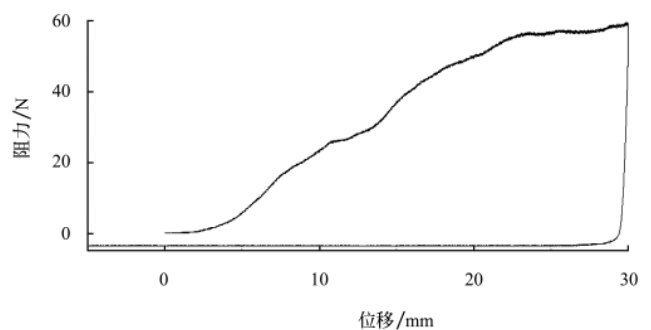


图 4 15%含水率 300 mm 击实行程的土样贯入阻力与位移的关系

Fig.4 Relationship between penetration resistance and displacement for 300 mm falling height and 15% moisture content

图 4 中可见,贯入阻力随位移的增大而增大,但渐趋平缓。对所有曲线进行分析发现,当贯入深度达到 20 mm 时,曲线都趋于平缓。另外,图中的测试曲线从 30 mm 深度处迅速减小至一强度较小的负载荷,并随后沿水平方向回到原处,这是探针回程的应力过程。最大贯入阻力一般发生在贯入深度为 25~30 mm 处,如图 5 所示。因此,本文将最大贯入阻力与探针截面积之商作为土壤的圆锥指数 CI 值。

将各含水率条件对应的圆锥指数绘于图 6,获得一组圆锥指数与击实行程的关系曲线。

由图 6 可知,不同含水率土壤的圆锥指数随击实行程的增大近似线性增大。另外,随着含水率由小到大的变化,圆锥指数就不再随击实行程的增大而显著增大。当含水率大于 25% 时,圆锥指数几乎与击实行程无关。

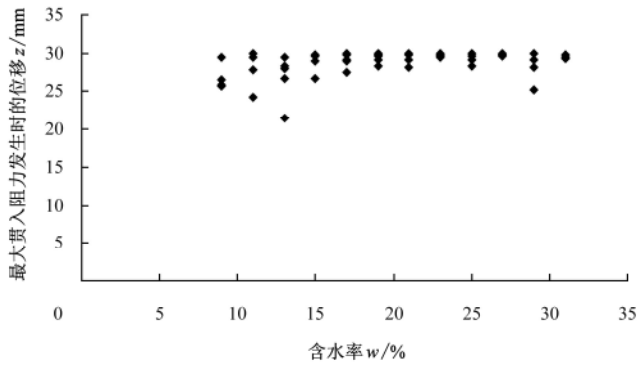


图 5 最大贯入阻力发生时的贯入位移

Fig.5 Displacement for the maximum penetration resistance

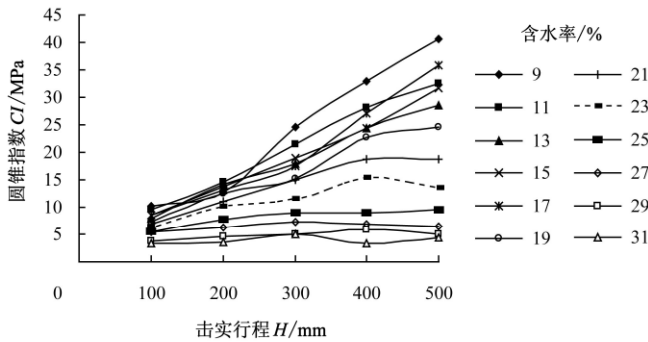


图 6 圆锥指数与击实行程之间的关系

Fig.6 Relationship between cone index and compacting displacement

对 5 个击实行程下土壤圆锥指数与含水率的关系进行整理, 得到图 7。

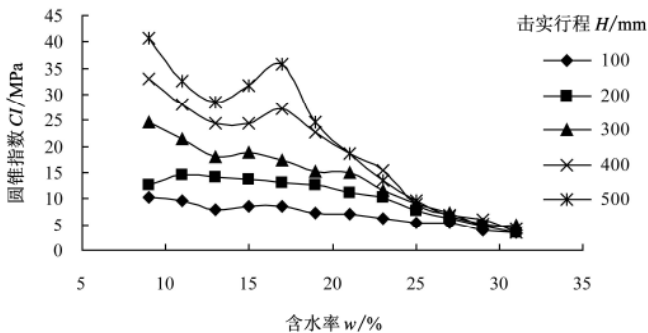


图 7 圆锥指数与含水率之间的关系

Fig.7 Relationship between cone index and soil moisture content

图 7 中可见, 圆锥指数随含水率的增大而减小, 击实行程越小, 圆锥指数变化越不明显。当含水率达到一定程度时, 各个击实行程下的圆锥指数逐渐趋于一致。

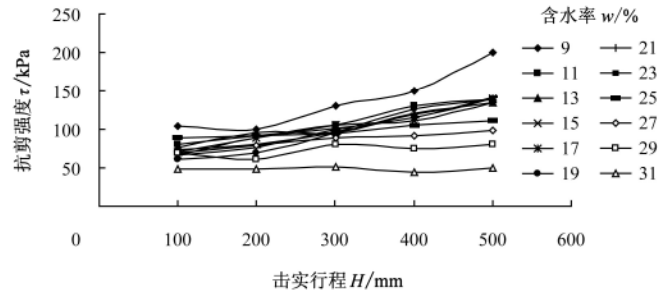
2.2 抗剪强度与击实行程、土壤含水率之间的关系

以 200 kPa 载荷下的重塑土样抗剪强度值为例, 分析其与击实行程、土壤含水率之间的关系, 如图 8、9 所示。

由图 8 所知, 200 kPa 载荷下土壤的抗剪强度随击实行程增大近似线性增大。与圆锥指数类似, 当含水率大到一定程度, 抗剪强度随击实行程变化不明显。

由图 9 可知, 抗剪强度随含水率的增大而减小。当含水率较高时, 各击实行程下抗剪强度值趋于一点。并

且, 在 200 kPa 载荷下, 试样抗剪强度与含水率的关系曲线以 23% 的含水率为界分为两段, 当含水率小于 23% 时, 对其进行拟合如图 10 所示。



注: 试验条件为 200 kPa 正应力

图 8 抗剪强度与击实行程之间的关系

Fig.8 Relationship between shear strength and compacting displacement

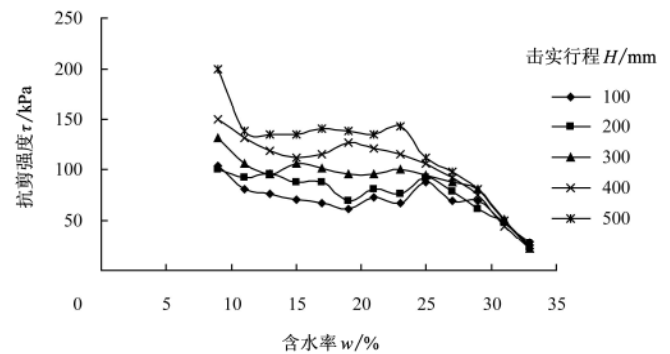


图 9 抗剪强度与含水率之间的关系

Fig.9 Relationship between shear strength and soil moisture content

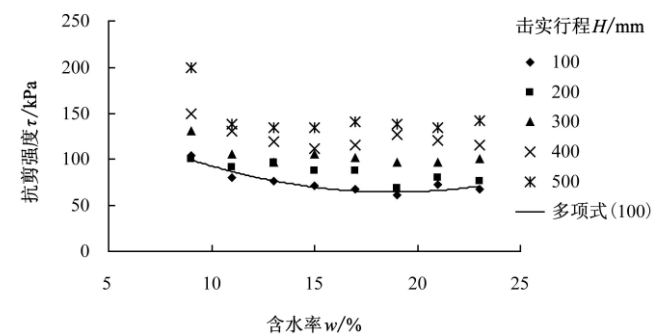


图 10 含水率小于 23% 的土样抗剪强度与含水率的关系

Fig.10 Relationship between shear strength and soil moisture content for soils below 23% moisture content

对各个击实行程下的抗剪强度-含水率曲线分别拟合, 发现其满足二次多项式模型 $\tau = aw^2 + bw + c$ (τ 为抗剪强度, w 为含水率, a 、 b 、 c 为二次多项式各项系数), 拟合公式见表 3。

当含水率大于 23% 时, 抗剪强度随含水率的关系接近线性变化, 如图 11 所示。

对各击实行程下的抗剪强度-含水率曲线分别拟合, 发现含水率小于 23% 时其满足线性关系, 拟合精度较高。拟合公式见表 4。

表 3 含水率小于 23% 土样的抗剪强度与含水率关系曲线拟合方程
 Table 3 Curve-fitting equations of the relationship between shear strength and soil moisture content for soils under 23% moisture content

击实行程 H/mm	抗剪强度-含水率曲线拟合方程	R^2
100	$\tau = 3634.2w^2 - 1367.8w + 193.42$	0.8936
200	$\tau = 457.86w^2 - 325.08w + 125.86$	0.7319
300	$\tau = 3004.7w^2 - 1120.6w + 200.15$	0.7200
400	$\tau = 3519.8w^2 - 1283.1w + 231.6$	0.7009
500	$\tau = 7068.2w^2 - 2503.3w + 350.17$	0.6712

注：表中 τ 为抗剪强度； w 为土壤含水率； R^2 为决定系数，下同。

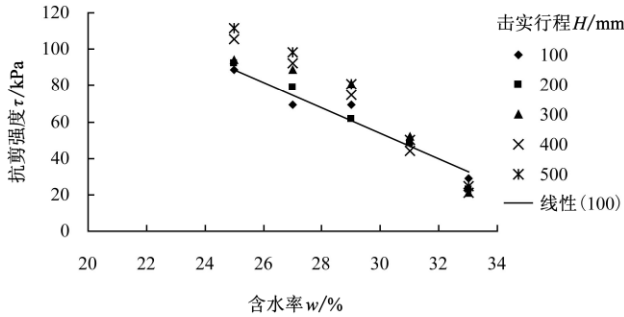


图 11 含水率大于 23% 的土样抗剪强度与含水率的关系
 Fig.11 Relationship between shear strength and moisture content for soils above 23% water content

表 4 含水率大于 23% 土样的抗剪强度与含水率关系曲线拟合方程
 Table 4 Relationship between shear strength and moisture content for soils above 23% water content

击实行程 H/mm	抗剪强度-含水率曲线拟合方程	k_1	b_1	R^2
100	$\tau = -701.9w + 264.32$	-701.90	264.32	0.9429
200	$\tau = -846.12w + 306.14$	-846.12	306.14	0.9862
300	$\tau = -913.43w + 332.2$	-913.43	332.20	0.8971
400	$\tau = -1086.5w + 382.77$	-1 086.50	382.77	0.9786
500	$\tau = -1105.7w + 393.73$	-1 105.70	393.73	0.9767

注： k_1 为拟合方程的斜率； b_1 为拟合方程在 y 轴上的截距，下同。

2.3 圆锥指数与抗剪强度的关系

含水率增大到一定程度，土壤会产生流变，无论是圆锥指数还是抗剪强度随着含水率的增大均趋于一致。而且图 9 可知，200 kPa 载荷下，抗剪强度与含水率的变化曲线出现分段现象。因此，我们分析圆锥指数与抗剪强度的关系时也以 23% 的含水率为界，如图 12 所示。

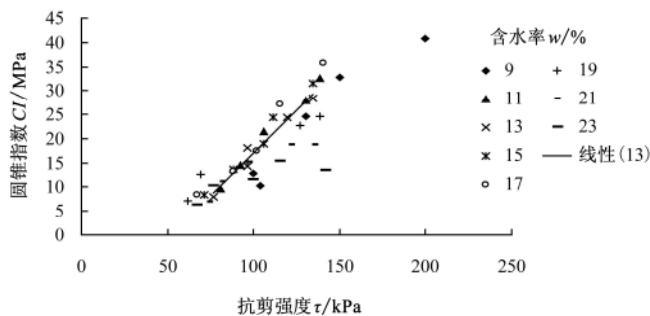


图 12 200 kPa 载荷下含水率小于 23% 的土样抗剪强度与圆锥指数的关系
 Fig.12 Relationship between cone index and moisture content for soils below 23% water content under 200 kPa load

由图 12 所知，含水率小于 23% 时，抗剪强度与圆锥指数的关系近似线性变化，进一步对曲线进行拟合。拟合方程见表 5。

表 5 含水率小于 23% 土样的抗剪强度与圆锥指数关系曲线拟合方程

Table 5 Curve-fitting equations for the relationship between cone index and moisture content for soils below 23% water content

含水率 $w/\%$	CI 与 τ 关系曲线拟合方程	k_2	b_2	R^2
9	$CI = 0.3067\tau - 17.758$	0.3067	-17.758	0.9260
11	$CI = 0.3787\tau - 20.262$	0.3787	-20.262	0.9860
13	$CI = 0.3547\tau - 18.493$	0.3547	-18.493	0.9642
15	$CI = 0.3722\tau - 18.644$	0.3722	-18.644	0.9811
17	$CI = 0.3923\tau - 19.884$	0.3923	-19.884	0.9641
19	$CI = 0.2075\tau - 3.9613$	0.2075	-3.9613	0.9610
21	$CI = 0.1823\tau - 4.3270$	0.1823	-4.3270	0.8898
23	$CI = 0.0949\tau - 1.8656$	0.0949	-1.8656	0.6882

注：表中 CI 为圆锥指数， k_2 为拟合方程的斜率； b_2 为拟合方程在 y 轴上的截距。

由表 5 可知，当含水率达到 23% 时，抗剪强度与圆锥指数关系拟合方程精度已经不是很高。因此，含水率再增大时，两者关系发生很大变化，如图 13 所示。

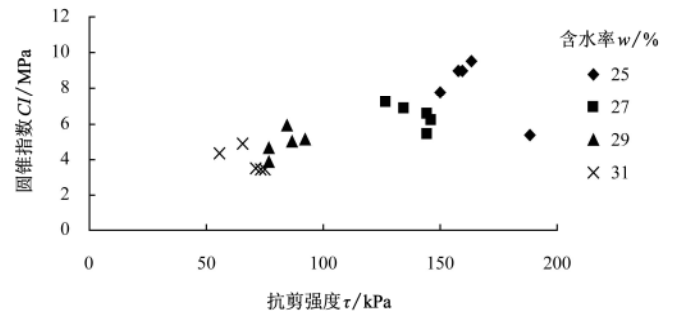


图 13 200 kPa 载荷下含水率大于 23% 的土样抗剪强度与圆锥指数的关系
 Fig.13 Relationship between cone index and shear strength for soils above 23% water content under 200 kPa load

由图 13 可知，含水率大于 23% 时，抗剪强度与圆锥指数之间无明显关系。

不考虑含水率影响的条件下，将 200 kPa 载荷下试验所得的抗剪强度与圆锥指数的所有数据放在一起进行比较，如图 14 所示。

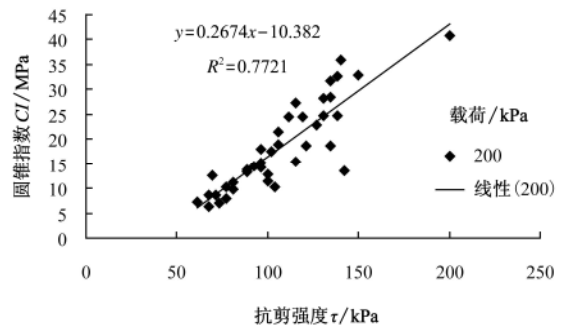


图 14 200 kPa 载荷下不考虑含水率影响土壤的圆锥指数与抗剪强度关系
 Fig.14 Relationship between cone index and shear strength without the influence of moisture content under 200 kPa load

由图 14 可知, 不考虑含水率与击实行程等条件的影响, 抗剪强度与圆锥指数的总体特征变化符合线性关系。

综合上述, 通过微型贯入试验与剪切试验得到重塑黏土的圆锥指数与抗剪强度值, 通过分析, 当含水率在一定范围时, 针对一定的 CI 值与一定垂直载荷, 两者变化关系符合线性模型。其数学模型为

$$CI = k\tau + b$$

式中, CI 为圆锥指数, MPa; τ 为抗剪强度, kPa; k 、 b 为与土壤类型, 含水率等有关的常数。

3 结 论

1) 非标准普氏击方法通过调节击实功制取性状不同的重塑黏土样品, 从而便于系统测试黏土的圆锥指数与抗剪强度关系。结果发现二者均随含水率的增大而减小, 随着击实功的增大近似线性增大。不过当含水率增大到一定程度时, 击实功对 2 个参数几乎没有影响。

2) 黄土质黏性土表现出临界含水率的特点, 抗剪强度与含水率的变化关系以及二者间的相关关系都受到该临界含水率的影响, 因此需要使用分段处理才能够得到圆锥指数与抗剪强度随含水率的变化关系以及二者相互间的关系。

3) 除了重塑软黏土的圆锥指数及抗剪强度随含水率的变化关系外, 三者集中在一起后含水率的作用就不再显现, 此时圆锥指数与抗剪强度呈简单的线性相关关系。

[参 考 文 献]

- [1] Utomo W H, Dexter A R. Age hardening of agricultural top soils[J]. *J Soil Sci*, 1981, 32: 335—350.
- [2] Liqun Chi, Sylvio Tessier. A portable micro-penetrometer for measuring seed row compaction[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 34: 27—39.
- [3] Aude Gallardo-carrera, Joël Léonard, Yves Duval. Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95: 207—217.
- [4] Clivati-mcintyre A A, E L Mccoy. Fractional Brownian description of aggregate surfaces within undisturbed soil samples using penetration resistance measurements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88: 144—152.
- [5] Karunatilake U P, H M Van Es. Rainfall and tillage effects on soil structure after alfalfa conversion to maize on a clay loam soil in New York[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67: 135—146.
- [6] Zhang B, Zhao Q G, Horn R. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 59: 97—106.
- [7] Christian J. Roisin C. A multifractal approach for assessing the structural state of tilled soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 71(1): 15—25.
- [8] Jody D. Priddy, William E. Willoughby. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure[J]. *Journal of Terramechanics*, 2006, 43: 85—96.
- [9] 田中孝. 水田拖拉机行走装置的研究[J]. *农业机械学报*, 1979, 10(4): 111—117.
- [10] 刘大维, 陈吉清, 陈秉聪. 沼泽地土壤圆锥指数和剪切强度的试验研究[J]. *农业机械学报*, 1999, 30(1): 5—8. Liu Dawei, Chen Jiqing, Chen Bingcong. Study on the cone indices and shear strengths of musker soil[J]. *Transactions of the CSAM*, 1999, 30(1): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王文隆, 王修斌. 地面力学中土壤参数的选定及其测量方法和仪器[J]. *农业机械学报*, 1983, 4: 1—9. Wang Wenlong, Wang Xiubin. The study of soil parameter standard in the terramechanics and the instrument for parameter measuring[J]. *Transactions of the CSAM*, 1983, 4: 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [12] 庄继德. 汽车通过性[M]. 吉林: 吉林人民出版社, 1980.
- [13] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [14] Adekalu K O, Okunade D A, Osunbitan J A. Estimating trafficability of three Nigerian agricultural soils from shear strength-density-moisture relations[J]. *International Agrophysics*, 2007, 21: 1—5.
- [15] 秦植海. 微型贯入仪测定界限含水量试验研究[J]. *河北水利专科学校学报*, 1991(2): 21—24.
- [16] 汪攀峰, 丁启朔. 黏土单层击实试验与制样因子研究[J]. *岩土力学*, 2010, 30(6): 1797—1802.

Relationship between cone index and shear strength of remolded clayey soil

Feng Xiaobin, Ding Qishuo^{*}, Ding Weimin, Ji Changying, Wang Di

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to acquire the cone index (CI) and shear strength (SS) of the remolded soil, quantification of the adhesion and traction performance of wheeled vehicle and its trafficability on clayey soil were conducted by remolding the soil with non-standard proctor compaction and performing micro-penetration and shearing tests. A threshold value of soil moisture content, 23% by mass, was found to change the trend of CI and SS with variety of soil water content. Below this threshold value, both CI and SS were found to follow a 2nd order polynomial trend with variety of water content increase, while higher above this value, the correlation between CI and soil moisture content or SS and soil moisture content vanished. Another notable result was an overall linear correlation between CI and SS of the remolded soil when its water content was lower than the threshold value.

Key words: soil mechanics, clay, shear strength, adhesion, cone index, vehicle trafficability