

珠江三角洲水田土壤承压特性探讨^{*}

苏显添 王前健 贺 杰

(农机系)

提 要

通过对粘土和壤土的田间测定表明, Bekker的“压力一下陷”关系公式以及园锥指数法不适用于珠江三角洲水田土壤情况, 进一步验证和论述了《土壤参数与行走机构关系》研究课题组的有关结论; 分析了在同等压力下不同的园盘面积对下陷量的影响, 对采用小面积园盘测定有关水田土壤参数, 以探索“压力一下陷”数学模型, 提出否定意见。

一、前 言

目前, 在国外描述土壤的承压强度方面主要流行有两种方法: 一种是属于半经验性质的, 由Bekker提出的“压力一下陷”关系公式 $P = (K_{\phi} + \frac{k_c}{b})Z^n$ 。根据这一公式, 可利用贝氏仪测量并求出摩擦变形模量 K_{ϕ} 、内聚变形模量 K_c 及土壤变形指数 n 。这三个数通常称为贝氏值, 是表征土壤特性的参数; 另一种是纯属经验性质的、由美国水道试验站(WES)提出的“园锥指数”法。这一方法认为土壤的承压强度可以用一个正园锥贯入土壤所遇到的阻力来表示, 并以在一定的贯入速率下在规定的深度间隔内, 平均的贯入力除以锥体底面积之商, 来定义土壤的园锥指数(CI)。此外, 不少学者还提出了各种不同的描述土壤承压强度的研究方法。我们之所以选择上述这两种方法进行研究分析, 只是因为它们已发表了大量的资料, 获得了比较普遍的应用。尤其是这两种方法是否适用于水田土壤情况, 还有待于进一步探讨。

我国的饱和软土通常分为沿海淤积软土、湖泊淤积软土和谷地淤积软土三类。沿海淤积软土主要位于各河流的入海口处, 通常含有河滩淤积和三角洲淤积两种。由于淤积物质来源复杂, 淤积条件和环境多变, 所以一般层次复杂, 成份不均和规律很差。水田土壤的特性与其形成条件有密切关系, 相应于沿海、湖泊和谷地等地区所形成的水田土壤, 其特性是差异很大的。

为了掌握沿海地区水田土壤承压特性的现场资料, 我们于1981年12月到位于南海之滨的平沙农场进行田间试验。使用的仪器是SY—1型静载承压仪。测头型式为: 园锥测头—锥角30°, 底面积3cm²; 园盘测头—小园盘(直径2.7cm)、中园盘(直径3.56cm)、大园盘(直径6.0cm)。试验地的土型有两种: 一种是收割前排水不净、表土浸水

^{*} 本文承何宪章高级工程师、邵耀坚教授审阅指正, 特此致谢。

1~2 cm的粘土稻茬田；另一种是收割前排水不净、表土浸水1~4 cm的壤土稻茬田。为方便计，本文以下所提的水田土壤，均指三角洲类型而言。

图1—a、b分别为30°圆锥测头和园盘测头（小园盘、中园盘和大园盘）在粘土稻茬田试验地上测定的原始曲线；图2a、b相应为在壤土稻茬田试验地上测定的原始曲线。

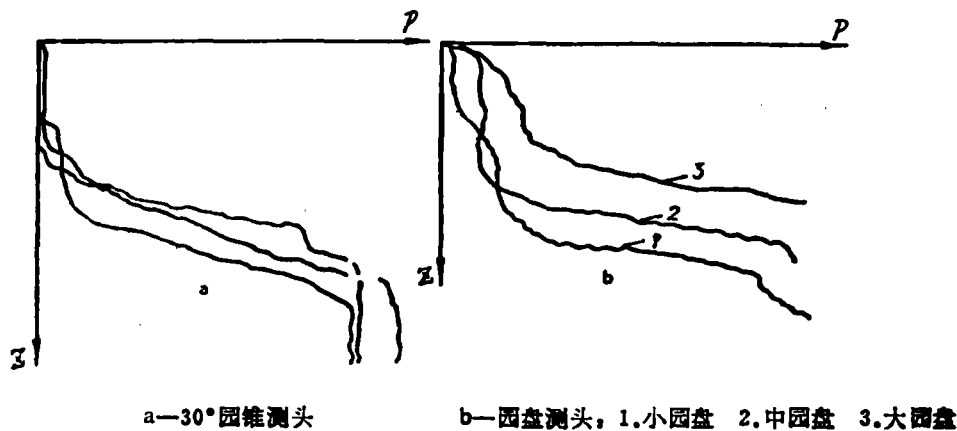


图1 粘土试验地上的原始曲线

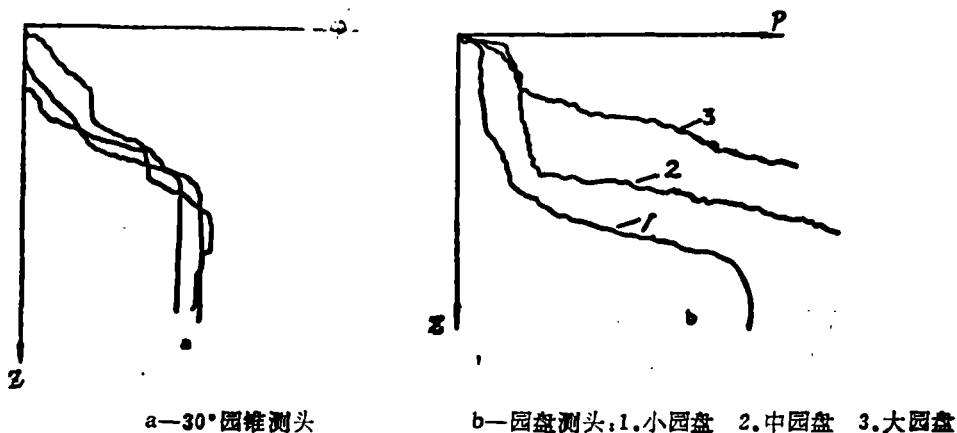


图2 壤土试验地上的原始曲线

二、曲线整理及其分析

对原始曲线进行试验统计处理，可以将它们整理为具有代表性的典型曲线，今以陷深 Z 为纵坐标，以一定陷深下所对应的各原始压力的平均值（含仪器自重） $\bar{P}$ 为横坐标，分别画出在两类土壤中各种测头的典型曲线。代表30°圆锥、小园盘、中园盘及大园盘测头在粘土和壤土试验地上测绘得的典型曲线，分别如图3—a、b、c、d和图4—a、b、c、d、所示。

从30°圆锥测头在粘土上的典型曲线可以看出：由表土到大约12cm深度处为承压能

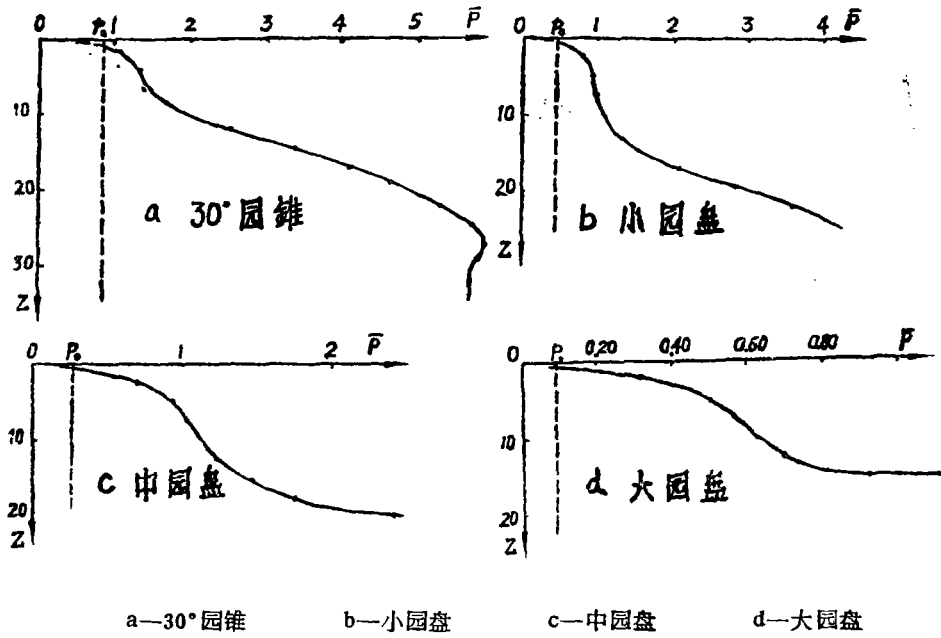


图3 粘土试验地上测绘得的典型曲线

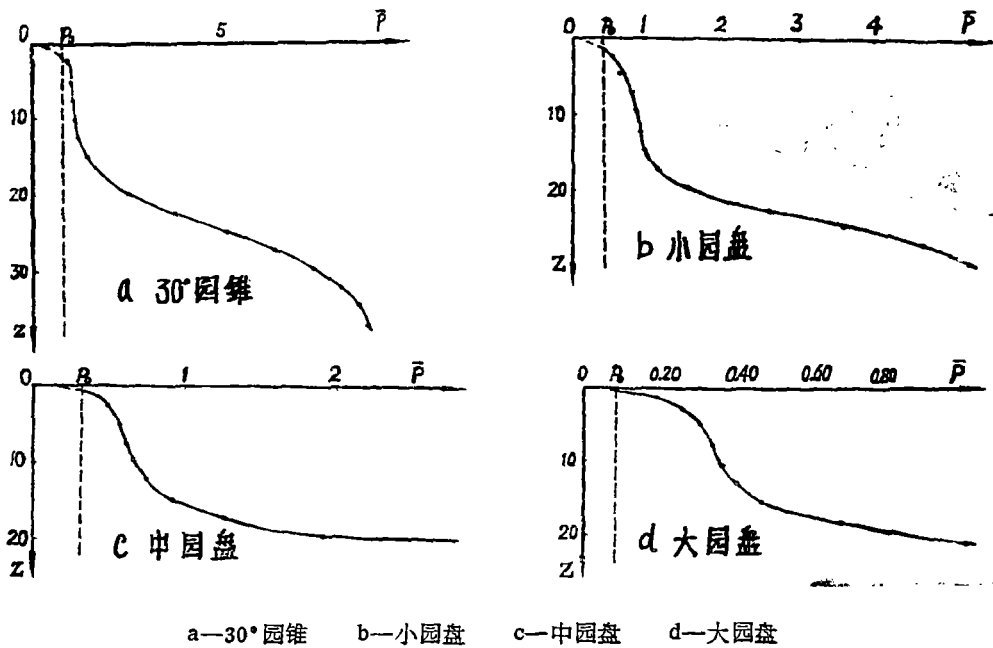


图4 壤土试验地上测绘得的典型曲线

力较低的耕作层, 12cm至22cm深度处为承压能力逐渐增加的硬底层, 22cm深度下方的土层又逐渐变软, 压力—陷深曲线的梯度随着压力的增加而缓慢下降。

从30°圆锥测头在壤土上的典型曲线可以看出: 由表土到大约8cm深度处为承压能力较低的耕作层, 8cm至24cm深度处为承压能力逐渐增加的硬底层, 24cm深度的下方则出现一软土层, 承压能力随陷深的增大而基本不变甚至稍有下降。

从原始曲线及其整理分析可知: 水田土壤(不管是粘土或是壤土)的性质是不均匀的, 尤其在垂直剖面上成层次结构, 即使在同一层内, 性质也是不均匀的。而且在硬底层的下方, 往往会出现软土层的情况。

三、对Bekker“压力—下陷”公式及圆锥指数法的评述

(一) 对Bekker的“压力—下陷”公式的评述

从对两种土壤的“压力—下陷”典型曲线的分析可知, Bekker的公式

$P = (K\phi + \frac{k_c}{b})Z^n$ 不适用于水田土壤情况, 这是因为:

(1) 贝氏公式是在均质土壤的前提下根据大量试验结果而导出的, 无疑它对于象古典土壤力学所假设的一样, 把土壤看作各自同性、均匀连续的半无限线性变形体来说, 是比较符合的。但是实际上的水田土壤并不均匀, 尤其在垂直剖面上是成层次结构的。水田的耕作层往往属于粘滞性液体, 而硬底层则处于半塑性状态或完全塑性状态。从“压力—下陷”原始曲线可以看出, 水田土壤不但在不同的层次性状不同, 就是在同一层次内也是不均匀的(图1、2)。

Bekker也曾提出用三个测盘进行试验, 为确定不均匀或两层土壤的参数提供最低限度的必要资料。但他的分析也是以理想土壤为前提, 即表层和底层土壤都是均匀的, 且在两层间有明显的分界。实际上的水田土壤与此相差甚远, 同时由于这个方法的试验手段和数据处理都相当繁琐, 我们就没有进行尝试。

(2) 根据Bekker的意见, 贝氏值 K_c 、 $K\phi$ 和 n 不受测头大小的影响, 是一组表征土壤特性的常值参数。对某一给定的测头来说, b 将为定值, 因而 $P-Z$ 曲线将是一个幂函数曲线, 即关系曲线应该是光滑连续的, 或是由直线组成。但从水田土壤实测的“压力—下陷”曲线来看, 则是曲拐型的不连续的曲线(图1、图2、图3、图4)。

(3) 贝氏公式认为对于任何土壤条件, 不同尺寸的圆盘测得的 $P-Z$ 关系曲线, 其 n 值相等。因而在双对数坐标上, 标绘得的关系曲线应为直线, 而且各直线互相平行。但在水田土壤中, 测盘尺寸的不同, 引起 n 值的变化是明显的。即使同一测盘, 在给定的土壤条件下所测得的 $P-Z$ 曲线, 从耕作层到硬底层, 土壤变形指数 n 由小于1变化到大于1。在双对数坐标上, $P-Z$ 关系曲线并非直线, 同时也不互相平行, 如图5—a、b所示。

事实上, 过去国内外不少研究人员对贝氏公式曾经提出异议和补充。我国《土壤参数与行走机构关系》研究课题组指出: 在成层的水田土壤中, 应用Bekker模型将出现难以克服的缺点¹。日本田中孝的田间试验结果表明: 对于分层的、非均质的土壤,

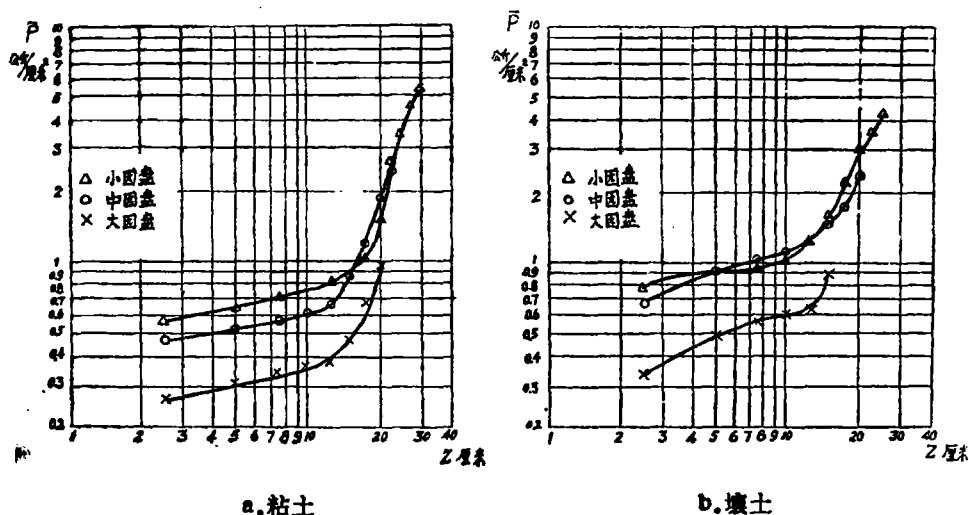


图 5 双对数坐标上不同圆盘测定的 $P-Z$ 曲线

应用Bekker的理论判断通过性,存在很多问题^[2]。Wells等在实验室里用贝氏仪测量了 K_c 、 K_ϕ 和 n 等土壤参数,根据在给定的土壤条件下 n 值应是不变的假设,多次出现 K_c 和 K_ϕ 为负值的情况,而这个负值是没有意义的^[7]。此外,Reece, Wills, Karafiath, Evans以及Kacigin和Guskov等对贝氏公式或则持否定态度,或则进行了修正和引伸^[3]。有鉴于此,为了节省篇幅,本文不再进一步论述和求算水田土壤中的 K_c 、 K_ϕ 和 n 等数值。

(二) 对圆锥指数的评述

近年来,在国外一些研究人员倾向于用WFS的圆锥指数反映土壤的承压强度特性。例如日本田中孝在进行通过性能方面的试验研究中,主要采用WES法^[2]。又如Wells等认为迄今所发表的实验结果表明,根据土壤的含水量和容积密度预测土壤强度特性的方法,成功与否的根据将很可能是土壤圆锥指数^[7]。这些论述,对于一般的含水量不太大的土来说,看来是相符的。但对于水田土壤来说,那就另作别论了。Ayers等最近对5种不同类型的土样的研究表明^[8];在常压力下,最大圆锥指数在相应于最大剪切强度(由三轴压缩试验测得)的含水量时产生,当含水量增加到一定数值后,例如达到约15~30%时(视土样类型而异,随土样粘土成份的增加而增加),则圆锥指数很小甚至趋向于零。对于给定的土样,当低含水量时,干容重相当大地影响圆锥指数的数值,而在较高含水量时,则圆锥指数不大随干容重而变化,如含水量达到20%,圆锥指数基本不变。

Wells等(1978)的试验也表明^[7]:当含水量由2%增至25%的相对较软的土壤条件下,在不同的容重时,圆锥指数的差别很小。

通过30°圆锥测头在粘土和壤土水田试验地上的测定表明,以圆锥指数反映水田土壤的承压强度特性,主要存在如下两个难以解决的问题:

其一,从测得的原始曲线看到,它们多呈曲拐形,在对应于表层或下方软层的线段许多与Z轴平行(图1—a、图2—a),因而不能确切地反映贯入压力与下陷量之间的内在联系。关于这一点,《土壤参数与行走机构关系》研究课题组在1979年就已指出:“在这样的曲线上阻力与下陷间没有唯一的对应关系,很难将圆锥指数与下陷联系。”

现场测定表明:我们的试验与Ayers及Wells等的研究是相吻合的。因为对同一种土来说,土壤的强度主要取决于它的容重,根据Ayers和Wells等的试验,当含水量较高时,圆锥指数不随干容重变化,也就是说此时测得的基本不变的土壤圆锥指数,并不反映土壤强度的实质,因而土壤的强度便不能用圆锥指数来描述。水田土壤耕作层和硬底层的含水量,往往都超过30%,按照上述研究结论,在水田中是很难测得准确的、反映土壤强度特性的圆锥指数的。

其二,水田土壤的性状,由于它们各自形成的历史条件不同而错综复杂,有些在下方是有软土层的,而有些则没有。至于软土层的深度位置和厚度大小,也是不相同的。土力学中指出^[4],在垂直载荷作用下,土中会引起垂直压应力 σ_z ,它是引起沉陷的主要原因。把地基中具有相同垂直压力 σ_z 的点连接起来,形成灯泡状的等压线,简称压力泡。在相同的压力下,承载面积愈大,压力泡的影响也就愈深。

WES法在应用圆锥仪测定时,通常取0~15cm及15~30cm两层数据。现在假定有两块土壤性质相同的试验地,在30cm深度的下方,一块有软弱层,另一块则没有,如按圆锥指数判断,两块土壤的车辆通过性能应该是一样的。然而事实证明,前者在车辆通过时一定比后者具有更大的陷深,这是因为车辆所产生的压力泡影响及下方软土层之故。由此说明,圆锥指数本身不能预示下方软弱层的影响,但下方软弱层的存在,将大大影响机器的实际下陷量。

综上所述,以圆锥指数来表征水田土壤的强度特性,籍以预测车辆的通过性是行不通的。

四、关于在相同压力下,不同测盘面积对下陷的影响

土壤的承压能力不仅与土壤的物理力学性质有关,而且与承载面积的大小有关。测盘面积的大小,是影响承压能力的主要因素之一。在压力相同的条件下,压板的宽度(或直径)愈大,压力泡的影响愈深,因而大尺寸的测盘下陷也就愈深。

图6表示在压力 q 相同但承载面积不等时压力泡的情况^[5]。左图为一小承载面积,右图为大承载面积。压力泡的深度是各自压盘直径(或宽度)的1.5倍,此时 σ_z 等压线上的数值为载荷强度 q 的 $1/5$ 倍。

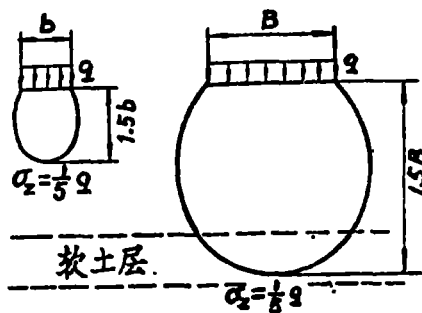


图6 压力相同、承载面积不等时压力泡的情况

如果在距表面一定深度处有一软土层, 当承载面积小时, 其垂直压力 σ_z 是影响不到软土层的, 但当承载面积大时 (比压相同), σ_z 就会影响到软土层, 而且承载面积愈大, 则影响的程度愈深。

图7是在天然地基上作载荷试验时得出的压力 q —沉降 S 关系曲线^[5], 从图中可以看出, 在同等压力下, 实际基础的沉降比试验压板的沉降大, 而下方有软土层的基础又比下方没有软土层的基础要大。

如果假设地基为均匀连续、各向同性的半无限线性变形体, 则土的应力应变关系可按弹性理论计算, 此时压力 q 与压板沉降 S 间存在如下关系^[5]:

对直径为 D 的圆形压板

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1-\mu^2}{E} q D$$

对边长为 B 的方形压板

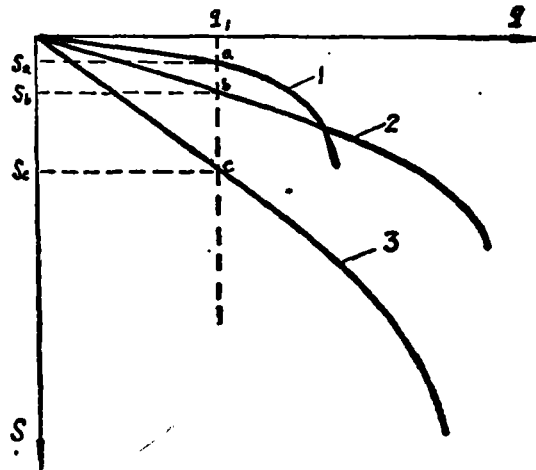
$$S = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{1-\mu^2}{E} q B$$

式中: μ —泊桑比; E —变形模量

对于给定的土体来说, μ 、 E 为常数, 当压力 q 相同时, 则沉降 S 与压板尺寸 D 或 B 成正比。

为了研究分析水田土壤在相同压力下不同承载面积对测盘下陷深度的影响, 我们选取同一土层的情况进行比较。图8、图9分别示出在粘土和壤土试验地上, 整理得的在相同压力 (p_1 及 p_2) 下, 小、中、大测盘 (d_1 、 d_2 、 d_3) 对下陷深度影响的曲线。

从图中看, 当压力 p 一定时, 下陷量 Z 与测盘直径 d 并非成正比关系, 特别是对小园



1. 压板 q — s 曲线
2. 下方无软土层的基础 q — s 曲线
3. 下方有软土层的基础 q — s 曲线

图7 压板与基础沉降比较

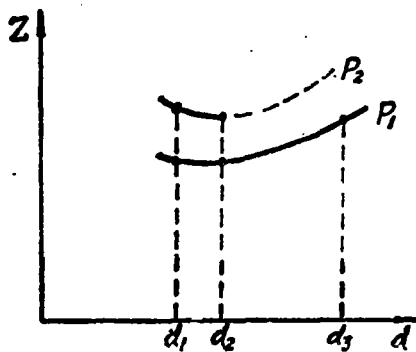


图8 粘土中相同压力下测盘面积对下陷的影响

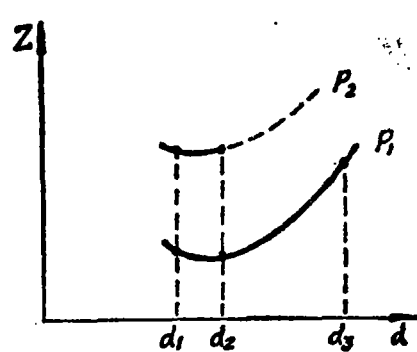


图9 壤土中相同压力下测盘面积对下陷的影响

盘来说,不但下陷不比中园盘的小,而且在两种土壤中都有增大的趋势。这与压力泡的概念是背道而驰的,这正说明水田并非理想土壤。表1、表2、分别列出粘土和壤土下陷

表1 粘土试验地上的Z—P相应数据

$Z \backslash \bar{P}$	小园盘	中园盘	大园盘
2.5	0.552	0.472	0.255
5	0.606	0.541	0.313
7.5	0.719	0.587	0.342
1.0	0.778	0.623	0.366
12.5	0.843	0.676	0.391
15	0.890 • 0.915	0.463	
17.5	1.061 • 1.261	0.683	
20	1.571 • 1.899	0.998	

表2 壤土试验地上的Z—P相应数据

$Z \backslash \bar{P}$	小园盘	中园盘	大园盘
2.5	0.773	0.680	0.311
5	0.907 • 0.918	0.498	
7.5	0.966 • 1.019	0.507	
10	1.061 • 1.099	0.613	
12.5	1.256	1.209	0.619
15	1.550	1.453	0.913
17.5	2.105	1.734	
20	2.873	2.393	

量Z与压力平均值P (含仪器自重)的相应数值。按理,在相同的陷深下,小园盘、中园盘和大园盘所需的贯入压力应当顺次减小。而表内小、中园盘间所带的“•”号,正是说明陷深Z一定时,小、中园盘的P值在数据大小方面出现颠倒的情况。另外,从表中没有产生颠倒的数字来看,中园盘与小园盘间数值的差值较小(它们之间的面积比为1.75);而大园盘与中园盘间数据的差值则较为明显(它们之间的面积比为2.80)。

上述颠倒的现象使人联想到用小面积的测盘来测定土壤(尤其是水田土壤)参数,借以预测机具的实际下陷量是否合理的问题。我们认为采用小面积测盘(尤其当测盘间的面积差太小时)测定水田土壤参数,存在如下难以克服的困难。

(一) 水田土壤的非均匀性和不连续性,使得小面积测盘的测量不可能得出合理的结果。对于土建和水利工程来说。由于基础的面积比砂石、土粒等的尺寸大得多,同时土体主要承受基础的静载作用,因此在实用中把土体看作各向同性、均匀连续的半无限线变形体,运用弹性理论求解,可以得出近似的结果。这正如在金属材料中,尽管从微观的角度来说,组成金属的晶粒是不连续的,它们的性质也不均匀,但由于具体的金属构件比起组成它的晶粒要大得多,因而从宏观上和统计学的角度来分析,可以把金属材料假设为各向同性和均匀连续的。但是,对于土壤——机器系统来说,情况就完全不同了。水田土壤是不连续和非均质的,尤其在垂直剖面上是成层次的塑体或粘滞性液体,工作时主要承受接地面积不算太大的机具或行走装置的瞬时载荷作用,因而不能按理想土壤的情况应用弹性理论求解。尤其对于具体测盘来说,当测盘面积太小时这个面积相比于土粒间的裂纹和孔隙没有足够大的话,对水田土壤的不连续性和非均匀性特别敏感,测盘面积愈小,则这种影响愈大。

(二) 如同对圆锥指数的分析一样,小面积的测盘,其压力泡影响的范围很浅,

不能反映下方软土层对测试曲线的影响,而对实际的机具或行走装置来说,其压力波波及的范围较深,下方软土层将影响机器的实际下陷量(图6)。

(三)小面积测盘在水田土壤的现场测定中,根本不能反映稻茬的根系对下陷的影响,而实际的机具或行走机构的下陷,则是受到稻茬根系的影响的。

实际上,过去不少的研究者曾对小面积测盘的测定提出怀疑。Wells等使用直径为4、6、8 cm等三种园盘测定并求算贯入压力 p 对下陷量 Z 间的关系,在总共25次(组合)的贯入试验中,有13次(组合)出现颠倒的情况。对于4 cm和6 cm园盘间曾出现11次负的 K_c 值(这将导致 K_ϕ 为负值),而在6 cm和8 cm园盘间才4次,4 cm和8 cm园盘间则为5次。Bekker本身的研究也表明,园盘的直径差愈大,可能出现负值的情况就愈小。Reece则提出,利用直径至少是10 cm的贯入园盘,可获得较满意的试验结果^[7]。王瑞麟高级工程师曾建议用三块园测盘作为推算实际机具下陷量的测试元件,三块测盘的面积差 ΔA 应具有足够的数值,才能确切反映测盘面积的影响^[6]。

综上所述,可以认为采用小面积测盘(尤其当测盘间面积差太小时)在现场测定水田土壤的承压能力参数,以预测机具或行走装置的实际下陷量,是很难得到合理和准确的结果的。另外,从图5表明,以SY—1型静载承压仪配以上述的小、中、大园盘所测得的在双对数坐标上的 p — Z 关系曲线,其与 p 轴相交的截矩(按Bekker的观点,当关系曲线为直线时,此值即代表变形模量 k),将为小于1的数值,在相同的压力量程下,园盘面积越大,其值越小。由于仪器的承压能力可测范围的量程所限,当采用较大的测盘时,可测的深度范围很小,据此推论,SY—1型静载承压仪也不适用于预测机具或行走装置实际下陷量的工作。

五、结 论

通过对粘土和壤土两种水田土壤的田间测定及试验分析,可归纳出如下结论:

(一)贝氏“压力一下陷公式” $P = (k_\phi + \frac{k_c}{b})Z^n$ 不适用于水田土壤情况。对于错综复杂的水田土壤来说,必须通过大量的田间试验及分析,才有可能归纳拟合出一个反映水田土壤承压规律的式子来。在归纳拟合的过程中,如使用过多的假设或前提条件,看来不会得到合理和准确的结果。

(二)美国水道试验站(WES)的圆锥指数法,也不适用于水田土壤情况。这点和《土壤参数与行走机构关系》研究课题组的试验结果是吻合的。

(三)使用小面积的测盘(尤其当测盘间面积差太小时)进行测定有关水田土壤参数,以探索“压力一下陷”数字模型,不会得到满意的结果。按此推论,由于量程所限,SY—1型静载承压仪也不适用于进行这类工作。

参 考 文 献

- [1] 《土壤参数与行走机构关系》研究课题组：水田土壤参数与履带下陷、驱动力间的关系，《农业机械学报》，10 (4) 1979：1—10。
- [2] 田中孝讲学摘要：水田拖拉机行走装置的研究，《农业机械学报》，10 (4) 1979：113—115。
- [3] 吴起亚、张德骏编：《农业工程力学》，76—78，上海科技文献出版社，1981年。
- [4] 天津大学等合编：《地基与基础》，110—114，中国建筑工业出版社，1978年。
- [5] 刘成宇主编：《土力学和基础工程》，96—98，中国铁道出版社，1980年。
- [6] 王瑞麟：不同测盘下的土壤承载特性，《农业机械学报》，(2) 1981：83—84。
- [7] L. G. Wells, O. Treesuwan：《The Response of Various Soil strength Indices to Changing Water Content and Bulk Density》，《Trans. of the ASAE》1978, Vol. 20, No. 5.
- [8] P. D. Ayers, J. V. Perumpral：Moisture and Density Effect on Cone Index 《Trans. of the ASAE》1982, Vol. 25, No. 5.
- [9] P. L. Capper, W. F. Cassie, "The Mechanics of Engineering Soils" Sixth Edition, London 1976, P. 96—98.

ANALYSIS ON THE SOIL PRESSURE-SINKAGE CHARACTERISTICS OF THE PADDY FIELD IN THE PEARL RIVER DELTA

Su Xiantian Wang Qianjian He Jie

(Department of Agricultural Machinery)

ABSTRACT

According to the field tests of the clay and loam soil in the Pearl River Delta area, Bekker's model of the pressure-sinkage and the method of the "Soil Cone Index" are not appropriate to the region. The conclusion which was made by Research Group for <Relation between Soil Parameters and Travelling Configurations> has been confirmed by the tests. The authors had carried out experiments and analysed the varying size of measuring dishes which have an effect upon the sinkage by constant pressure. There were different opinions in the investigation of the pressure-sinkage mathematical model by small area measuring dishes.