doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.033

基于应力传递系数的分析模型优化与土壤压实应力预测

贺亭峰[1,2]　丁启朔[3]　张　伟[1,4]　姜春霞[1,2]　刘恩科[1,2]

(1. 山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 太原 030000; 2. 有机旱作山西省重点实验室, 太原 030000;
3. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 4. 黄土高原东部旱作节水技术国家地方联合工程实验室, 太原 030000)

摘要: 针对目前基于有限尺度环刀的土壤应力传递系数(Stress transmission coefficient,STC)取值方法无法满足不同深度土壤条件下集中系数随加载环境变化研究的问题,将土壤剖面分割为有限尺度的土层,基于分析模型推导ΠSTC 公式,以多层土壤应力传递系数连乘方式计算田间指定深度土壤应力传递系数。基于传感器技术进行田间原位土壤平板下陷试验,通过控制压板直径和土层厚度实测 9 种加载状态下土壤的应力传递系数;同时,通过有限尺度(Φ50×50 mm 环刀)取样于室内,结合土压力传感器进行非扰动土单轴压缩试验,测量各土层(0~50 mm、50~100 mm、100~150 mm、150~200 mm)应力传递系数。运用 ΠSTC 公式计算 3 种深度(100、150、200 mm)土壤的应力传递系数分别为 0.30、0.17、0.07,综合实测数据通过双因素方差分析研究应力传递系数随加载环境的变化规律,由此反算不同加载条件的集中系数。结果显示,随着压板尺度的改变,实测与计算所得相同深度土壤的应力传递系数间并无显著差异,表明土壤应力传递系数与压板-土壤接触面当量半径无关,利用 ΠSTC 公式计算田间土壤应力传递系数方法可行;随土层厚度的增加,应力传递系数显著减小,说明应力传递性能随土层厚度的增加而逐渐减弱;集中系数随压板直径和土层厚度的增加而逐渐减小。利用分析模型较为准确地预测了田间指定加载环境和土壤环境中因连续加载而变化的土壤应力,优化了土壤压实应力传递的研究方法。

关键词: 土壤压实; 分析模型; 集中系数; 应力传递系数; 加载环境

中图分类号: S152.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0292-07　　**OSID**:

Optimization of Analytical Model and Prediction of Soil Compaction Stress Based on Stress Transmission Coefficient

HE Tingfeng[1,2]　DING Qishuo[3]　ZHANG Wei[1,4]　JIANG Chunxia[1,2]　LIU Enke[1,2]

(1. *Institute of Organic Dry Farming of Shanxi, Shanxi Agricultural University, Taiyuan* 030000, *China*
2. *Organic Dry Farming of Shanxi Province Key Laboratory, Taiyuan* 030000, *China*
3. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210031, *China*
4. *National Local Joint Engineering Laboratory of Water-saving Techniques for Dry Farming in the Eastern Loess Plateau, Taiyuan* 030000, *China*)

Abstract: Predicting soil stress with analytical models requires proper selection of the models' concentration factor. The parameter is a coupled result from both loading condition and the soil environment. Stress transmission coefficient (denoted as STC) was suggested in other study to investigate the soil state's effect on the concentration factor. Because the current limited-scale analytical approach of stress transmission coefficient may prevent accurate estimation of soil stress, there was a desperate need to make loading conditions' impact clear on concentration factor. The function of the concentration factor was transformed and a theory to calculate the soil stress transmission coefficient in-situ soil in field, ΠSTC equation, was derived, which complement, associated with the stress transmission coefficient in a limited scale after splitting the soil profile from large. Totally nine loading conditions were tested using in-situ soil by controlling three plate diameters and three soil thicknesses, and a modified oedometer testing setup with a soil stress sensor was used to measure stress transmission coefficient of different soil layers (0~50 mm, 50~100 mm, 100~150 mm and 150~200 mm) in-door. Stress transmission coefficient for the same depths with field experiment was 0.30, 0.17 and 0.07, and then calculated by ΠSTC

收稿日期: 2020-05-21　修回日期: 2020-06-29

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201703D21102-7)和山西省农业科学院博士基金项目(YBSJJ2015)

作者简介: 贺亭峰(1992—),男,助理研究员,博士,主要从事土壤耕作力学研究,E-mail: hetingfeng_543364@126.com

equation. Correlation analysis were performed to evaluate both measured and calculated STCs on controlled loading conditions (e.g. equivalent radius of the contact area and soil thickness). Then soil stress was predicted following the concentration factor back-calculated from the acquired STCs. The highly linear correlation between soil stress and applied surface stress indicated a stable STC for a particular soil state in field. In general, a thicker soil layer led to a decreased STC, and there was no significant difference in STCs varied with equivalent radius of the contact area, suggesting that the ΠSTC equation could be used as a specific method to quantify soil stress transmission in field. The back-calculation of concentration factor from measured STCs showed the details of how the concentration factor was affected by the changed loading condition with measured result. A good accuracy of the soil stress prediction based analytical model and ΠSTC equation meant a optimized solution was proposed for soil compacting stress prediction.

Key words: soil compaction; analytical model; concentration factor; stress transmission coefficient; loading condition

0　引言

田间行走机械不可避免地造成了土壤压实[1-3],而土壤应力是压实过程中导致土壤结构及其功能失效的主要原因[4-8]。因此,对土壤应力传递过程的定量描述是科学控制机械压实的重要前提。分析模型与仿真模型是研究土壤应力最常用的方法[9-11]。

与仿真法建立的土壤模型相比[12-15],土壤压实分析模型在使用时因所需参数少、操作简单而被广泛运用[16-21]。该模型基于 BOUSSINESQ 方程,经集中系数修正后[22-23],假设土壤在受压过程中表现为弹塑性变形,模型准确预测土壤应力的关键是选择合适的集中系数[24-25]。HORN 等[26] 与 SMITH 等[25]的研究表明,集中系数是关于轮胎-土壤接触面当量半径、土壤厚度、接触面表面应力与土壤应力的函数,通过实测表面应力 σ_0 与土壤应力 σ_z 可对该参数随加载和土壤环境的变化规律进行研究[25-27]。SÖHNE[23]研究发现,集中系数随含水率的增大而增大,提出土壤在坚硬、中度、松软 3 种条件下分别取值为 4、5、6。HORN 等[26]试验表明,集中系数与先期固结压力相关,集中系数取值范围为 6 ~ 9,且与轮胎-土壤接触面当量半径间呈负相关变化趋势。RAM[28]利用重塑土试验控制土壤含水率和容重,探究集中系数的影响因素,发现容重从 1.24 g/cm^3 变化到 1.63 g/cm^3 的过程中,对应的集中系数从 5.4 减小到 1.5。在其他同类型的研究中[27,29-31],集中系数取值范围是 2.0 ~ 14.3。

鉴于集中系数取值的不一致性,HE 等[24]通过定义表征应力在土壤中传递效率的无量纲参数——应力传递系数(Stress transmission coefficient,STC),研究了土壤环境因素对集中系数的影响。贺亭峰等[32]基于 30 种状态的重塑土壤试验发现,应力传递系数随土壤含水率的增大而增大,与土壤初始干密度、先期固结压力之间呈明显的负相关性,即高含水率的土壤条件更有利于应力往土壤底层传递,初始干密度与先期固结压力较大的土壤不易被压实,故而明确了土壤环境因素对集中系数的影响。

集中系数受土壤环境和加载环境双重影响[33],系统定量加载环境(轮胎-土壤接触面当量半径、土壤厚度)对集中系数的影响未知。轮胎-土壤接触面面积受轮胎尺寸、胎压及轴重等加载环境因素的直接影响[25-27],轮胎-土壤接触面当量半径即代表加载环境对集中系数的影响。从严格意义上讲,土层厚度并不属于加载环境,仅作为影响集中系数的一个重要参数[32],其变化必然引起土壤应力传递过程的改变。然而,基于有限尺度环刀(Φ50 × 50 mm)的土壤应力传递系数取值方法[24,32]无法满足不同深度土壤条件下集中系数随加载环境变化的研究。

本文对分析模型及应力传递系数进行研究,推导 ΠSTC 公式,以多层土壤应力传递系数连乘方式实现田间指定厚度土壤应力传递系数的计算;同时,基于土压力传感器技术进行田间原位试验和室内非扰动土试验,以期验证田间土壤应力传递系数是否稳定可测,分析应力传递系数与加载环境因素间的相关性,评价 ΠSTC 公式的可靠性,研究集中系数随加载环境的变化规律。

1　理论分析

使用分析模型预测土壤应力,假设加载力均匀地分布在当量半径为 R 的圆形接触面,此时接触面正下方 z 处垂直方向的应力可表示为

$$\sigma_z = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}}\right)^{\nu}\right] \tag{1}$$

其中　　$\sigma_0 = W/(2\pi R^2)$

式中　σ_0——轮胎-土壤接触面表面应力,kPa

W——轮胎-土壤接触面范围内的总载荷,kg

σ_z——轮胎-土壤接触面正下方 z 位置处垂直方向的应力,kPa

ν——集中系数

HE 等[24]通过公式推导,将集中系数转换为关于应力传递系数、土壤-轮胎接触面当量半径、轮胎-土壤接触面与正下方应力预测点间的垂直距离的函数,由此定量了集中系数随土壤环境的变化规律

$$\nu(S,R,z)=\frac{2\lg\dfrac{1}{1-S}}{\lg\left(\left(\dfrac{R}{z}\right)^2+1\right)} \tag{2}$$

其中 $S=\sigma_z/\sigma_0$

式中 S——土壤应力传递系数

本研究按照 TRAUTNER[20]的方法,在固定的土壤环境中,将土壤剖面进行分割,如图 1 所示,各土层厚度分别为 $z_1,z_2,\cdots,z_n$,假设应力在向下传递过程中每一土层垂直向下的土壤应力均匀分布,且把任一土层下表面的土壤应力作为模型输入,计算下一土层的土壤应力,同时假设理想状态下轮胎-土壤接触面形状为圆形。因此,在载荷为 W,半径为 R_0 的圆形压板作用下,压板-土壤接触面应力为 σ_0,各土层下表面垂直方向的应力分别为 $\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_n$(kPa),相应的应力传递系数分别为 $S_1,S_2,\cdots,S_n$。

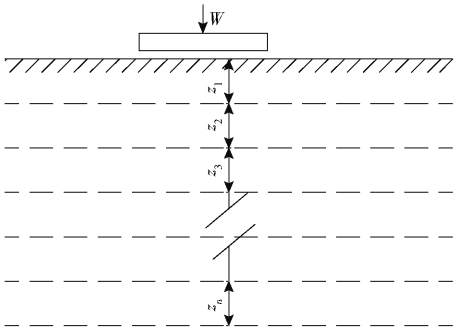


图 1 田间原位土壤应力传递系数计算原理图

Fig. 1 Diagram of field in-situ stress transmission coefficient calculation

因此,各土层下表面的土壤应力可表示为

$$\sigma_{i+1}=\sigma_i\left[1-\left(\frac{z_{i+1}}{\sqrt{R_i^2+z_i^2}}\right)^{\nu_{i+1}}\right] \tag{3}$$

式中 σ_i——第 i 层土层上表面应力

R_i——第 i 层土层上表面压实应力 σ_i 分布区域的当量半径,m

z_{i+1}——第 $i+1$ 层土层的厚度

ν_{i+1}——第 $i+1$ 层土层对应的集中系数

按照 TRAUTNER[20]的方法,第 n 层的土壤应力可表示为

$$\sigma_n=\sigma_0\left[1-\left(\frac{z_1}{\sqrt{R_0^2+z_1^2}}\right)^{\nu_1}\right]\left[1-\left(\frac{z_2}{\sqrt{R_1^2+z_2^2}}\right)^{\nu_2}\right]\cdots\left[1-\left(\frac{z_n}{\sqrt{R_{n-1}^2+z_n^2}}\right)^{\nu_n}\right] \tag{4}$$

简化后为

$$S_{\text{sum}}=\frac{\sigma_n}{\sigma_0}=\prod_{i=0}^{n}\left[1-\left(\frac{z_{i+1}}{\sqrt{R_i^2+z_{i+1}^2}}\right)^{\nu_{i+1}}\right] \tag{5}$$

式中 S_{sum}——整个土层的应力传递系数

S_{sum}是关于 R_i、z_{i+1}和 ν_{i+1}的函数,应力在土壤中传递时,除 z_{i+1}是可测常数,R_i和 ν_{i+1}均随土层深度发生变化[19],可知各土层的应力传递系数为

$$S_i=1-\left(\frac{z_i}{\sqrt{R_{i-1}^2+z_i^2}}\right)^{\nu_i} \tag{6}$$

式中 S_i——第 i 层土层的应力传递系数

根据文献[24]研究,假设各土层的应力传递系数 $S_1,S_2,\cdots,S_n$的数值可通过田间分层取样并结合室内单轴压缩试验测量,将所得数值代入式(5)可得

$$S_{\text{sum}}=\prod_{i=1}^{n}S_i \tag{7}$$

通过推导,指定厚度土壤的应力传递系数取值转换为对分割后各土层应力传递系数的测量。这种通过多层土壤应力传递系数连乘方式求解田间土壤应力传递系数的公式称为 ΠSTC 公式。

2 材料与方法

上述理论假设轮胎-土壤接触面形状为圆形,本试验选择不同尺度的圆形压板,基于土压力传感器技术,分别进行田间原位和室内非扰动土试验,土压力传感器被用于量化土壤内部应力和表面应力间的关系[11,16,25,29-31,34-35]。

2.1 田间原位试验

试验地点位于南京市六合区八百桥农场(118°93′E,32°42′N),农场为长期稻麦轮作区,试验时间 2018 年 11 月,试验地土壤为粘性水稻土,土壤液限 47%,塑限 26%,砂粒、壤粒、粘粒和有机质质量分数分别为 22%、39%、38% 和 0.32%。试验时选择一块未被扰动的地块,采用张维强等[36]的方法,测量该地块的贯入阻力,结果如表 1 所示(表中同列数据不同字母表示数据差异显著);参照柏建彩等[35]的研究,以倾斜角 30°钻孔方法将土压力传感器(Φ17×7 mm,量程 1 MPa)埋设于指定土壤深度的土层(土壤深度 100、150、200 mm),使用标准沙回填孔洞,如图 2a 所示;搭建台架如图 2b 所示,通过勾股定理定位加载位置;选用不同直径的压板(压板直径 80、100、150 mm)开始加载,并通过测控

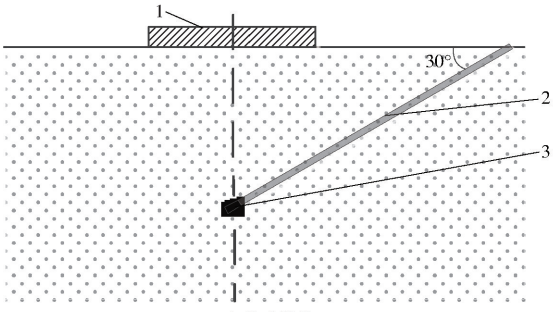
表 1　田间土壤物理参数

Tab. 1　Soil physical parameters in field

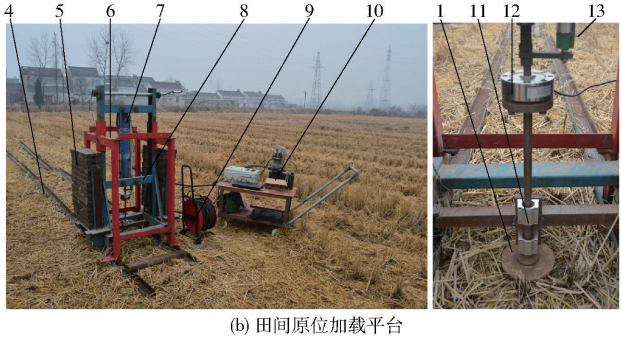
土层深度/mm	含水率/%	容重/(g·cm^{-3})	先期固结压力/kPa	贯入阻力/kPa
0 ~ 50	33^{ab}	1.69^{c}	60.79^{d}	200^{ab}
50 ~ 100	34^{ab}	1.70^{c}	74.58^{c}	350^{a}
100 ~ 150	34^{ab}	1.82^{ab}	88.85^{ab}	370^{a}
150 ~ 200	32^{a}	1.87^{a}	84.61^{a}	510^{a}

系统记录加载载荷信号及随之变化的土压力传感器应力信号，同时记录压板相应的下陷位移 ε。为防止相邻加载点之间的应力干扰，加载位置间隔不小于 1 m，每组参数试验重复 3 次。

区别于传统通过土壤剖面并水平钻孔放置传感器的操作，本研究采用的土压力传感器埋设的方式省时省力，在保证土压力传感器安放深度的同时，最大限度减少原位土壤的扰动[37-38]，经研究[38-39]此方法亦可达到预期测试效果，尤其能够满足短时间内进行多点测量的要求。



(a) 土压力传感器位置



(b) 田间原位加载平台

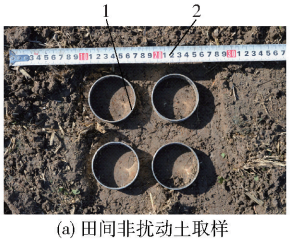
图 2　田间原位测控系统

Fig. 2　In situ instrumentation system

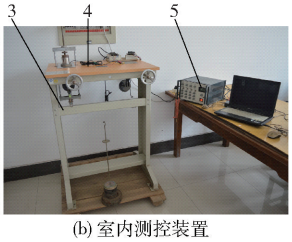
1. 压板　2. 标准砂　3. 土压力传感器　4. 导轨　5. 配重块　6. 龙门导向　7. 液压缸　8. 台架　9. 电缆　10. 测控系统　11. 压板导向装置　12. 称量传感器　13. 位移传感器

2.2　室内非扰动土试验

在进行田间原位试验的同时，于每个加载位置附近选择一块较为平整的未扰动区域，清茬后，使用内壁抹上一层凡士林的环刀(Φ50 × 50 mm)[40]，按如图 3a 所示方法进行取样，密封并贴好标签后继续取样至深度 200 mm。土样带回实验室并按照 HE 等[24]的操作，使用土壤固结仪对土壤样品进行加载，同时运用土压力传感器监测因逐次加载(σ_0)而变化的土壤应力(σ_z)(图 3b)，同时记录加载板下陷位移 ε(mm)[41]，进而获取各土层土壤的应力传递系数，测量得土壤含水率、容重如表 1 所示。



(a) 田间非扰动土取样



(b) 室内测控装置

图 3　有限尺度取样与固结仪试验

Fig. 3　Sampled in finite-size and oedometer test

1. 土壤样品　2. 标尺　3. 固结仪　4. 土压力传感器　5. 测控系统

2.3　数据分析

标定称量传感器、位移传感器与土压力传感器[40]。根据 CASSAGTANDE 方法[41]计算各参数土壤样品的先期固结压力，结果见表 1。采用 HE 等[24]的方法通过建立土壤应力-表面应力线性关系，获取田间不同厚度土壤的应力传递系数和室内非扰动土各土层(0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm)的土壤应力传递系数[24]。基于室内非扰动土壤试验结果，运用 ΠSTC 公式计算不同厚度土壤的应力传递系数。利用 SPSS - Statistics 20.0 统计软件[24]进行双因素(压板尺度、土层厚度)方差分析，采用 DUNCAN 方法进行多重比较(α = 0.05)。

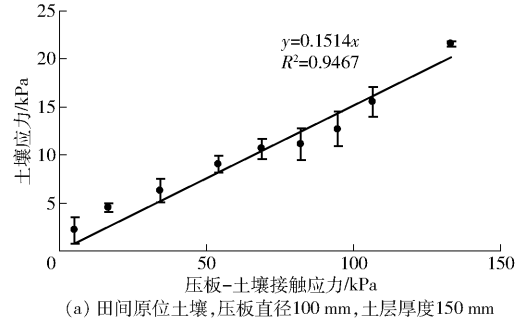
运用 ΠSTC 公式，首先获得土壤剖面各土层的应力传递系数，采用连乘的方式计算不同厚度土壤应力传递系数。

3　结果与分析

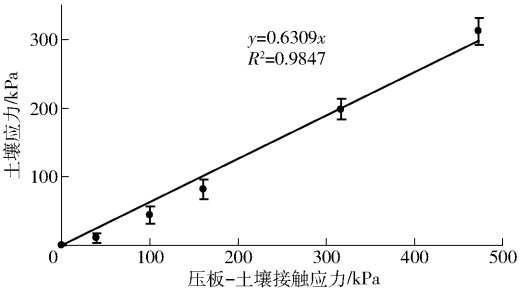
3.1　田间土壤应力传递系数

图 4 为田间原位土壤与室内非扰动土壤在承压过程中，土壤应力随压板-土壤接触面表面应力变化曲线。由图 4 可知，表面应力与土壤应力间线性关系显著，与贺亭峰等[32]的重塑土试验结果相同。因此，田间原位土壤和室内非扰动土壤均存在与重塑土同样的属性，即对于给定的土壤，在其一次性加载过程中，应力传递系数(σ_z/σ_0)始终保持恒定，且数值等于 $\sigma_z - \sigma_0$ 拟合曲线的斜率。由此获得各土层(0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm)的土壤应力传递系数均值分别为 0.63、0.48、0.55、0.44。应力传递系数为表征土壤自身应力传递性能

的独立物理参数,其受土壤特性的综合影响,结合表 1 可得各土层土壤含水率并无显著性差异,相应应力传递系数的变化规律亦不明显,而随着容重和先期固结压力的增大,应力传递系数基本呈减小趋势,与贺亭峰等[32]的试验结果一致。



(a) 田间原位土壤,压板直径100 mm,土层厚度150 mm



(b) 室内非扰动土壤,压板直径50 mm,土层厚度50 mm

图 4 一次加载过程中压板-土壤接触应力与土壤应力关系

Fig. 4 Relationships between soil stress σ_z and surface stress σ_0 in a loading process

3.2 加载环境对应力传递系数的影响

基于 IISTC 公式计算得 3 种厚度(100、150、200 mm)土壤应力传递系数分别为 0.30、0.17、0.07,如图 5 所示,随着压板直径的改变,实测与计算所得同等厚度土壤的应力传递系数间并无显著差异,表明对于给定的土壤,其应力传递系数并不受测量试验中压板直径的影响,可以忽略压板直径对测量结果的影响,也意味着运用 IISTC 公式计算田间土壤应力传递系数方法可行;同时验证了应力传递系数是与土壤综合特性相关的独立物理参数,其取值不受外界环境的影响[24]。由于应力传递系数是小于 1 的无量纲参数[32],根据 IISTC 公式推断,随着土层厚度的增加,应力传递系数呈下降趋势,田间试验结果表明,随着土层厚度的增加,应力传递系数均随之减小,即土壤的应力传递性能随土层厚度增加而减弱,与基于公式的推断完全一致。

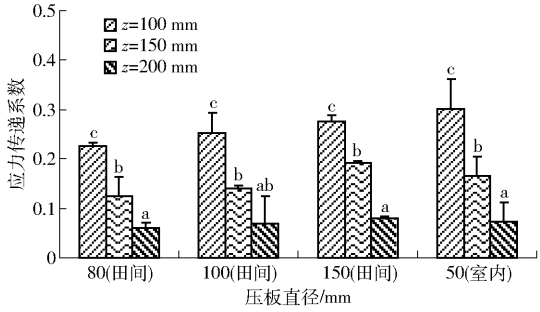


图 5 压板直径、土层厚度对应力传递系数的影响

Fig. 5 Effect of plate diameter and soil thickness on STCs

3.3 IISTC 公式计算土壤集中系数

文献[26-27,32]研究表明,集中系数受加载环境和土壤环境的双重影响,是关于应力传递系数、轮胎-土壤接触面当量半径和土层厚度的函数,通过计算所得不同加载环境(压板直径、土层厚度)中田间原位土壤集中系数如表 2 所示。由表 2 可得,随着土层厚度的增加,集中系数总体呈下降趋势,且随压板直径的增加而减小,这与 HORN 等[26]给出的结果一致。区别于传统基于土壤硬度的集中系数取值方法,IISTC 公式通过应力传递系数直接与加载环境参数建立关系。同样硬度的土壤,不同轮胎-土壤接触面当量半径 R、土层厚度 z,集中系数间存在较大差别。为了简化分析模型研究,采用圆形压板代替轮胎进行试验。

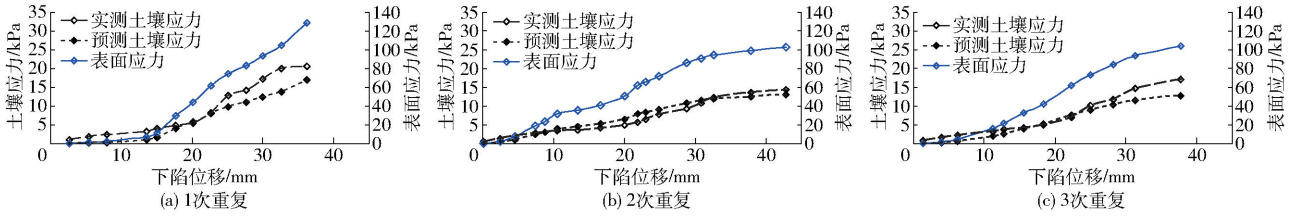
表 2 基于应力传递系数计算的集中系数

Tab. 2 Calculated concentration factors from STC

压板直径/mm	土层厚度/mm			
	50	100	150	200
80	4.83	4.94	4.67	3.17
100	3.44	3.28	3.11	2.38
150	2.03	1.64	1.43	1.25

3.4 模型预测土壤应力分析

由表 2 可知,压板直径 R = 100 mm,土层厚度 z = 200 mm 时集中系数为 2.38。图 6 为压板直径 100 mm,加载面正下方土层深度 200 mm 处垂直方向土壤应力的实测值与预测值的变化曲线。由图 6 可知,3 次重复试验中,土壤应力的预测和实测值变化趋势基本一致,随着加载力的增大而逐渐升高。



(a) 1次重复 (b) 2次重复 (c) 3次重复

图 6 压实过程中土壤压实应力的实测值与预测值

Fig. 6 Measured and predicted stress state during soil compaction process

如图 6a 所示，压板下陷使表面应力达到峰值 137.0 kPa，此时土壤应力预测值和实测值分别为 19.0、16.0 kPa。如图 6b 所示，预测曲线和实测曲线重合度较高，当压板分别下陷至 10、20、30、40 mm 位置时，实测土壤应力为 3.5、7.0、12.0、16.0 kPa，而相应预测值为4.0、7.5、13.6、14.0 kPa。如图6c 两条曲线几乎重合，当表面应力最大为 103 kPa 时，土壤应力的预测和实测值分别为 13、17 kPa。所有的实测土壤应力均在预测值上下浮动变化。由于试验期内雨水过多，田间土壤平均含水率较高（表 1），土壤极易被压实，3 次重复中，当下陷位移达 40 mm 时，加载力刚超过 100 kPa。

4　讨论

压实会影响土壤自身的物理、化学、生物特性，进而产生诸多农艺问题（如限制根系生长、作物减产等）和环境问题（侵蚀、养分丢失等）[27]。利用模型研究土壤压实过程可分为 3 个阶段[27, 32]：表面应力分布模型描述轮胎–土壤接触面应力分布；分析模型定量土壤应力；土壤失效模型研究应力引起土壤结构的变化。模型通过分析土壤应力传递等压实过程，为科学控制机械压实提供了可视化的数据。经 FRÖHLICH 等[22]和 SÖHNE[23]修正后，分析模型广泛地应用于土壤机械压实领域，然而传统的集中系数取值方法限制了该模型的准确性。由于对加载环境与土壤环境等因素影响土壤应力传递过程认识的不足[24,27]，尽管基于田间实测的轮胎–土壤接触面表面应力与土壤应力的集中系数研究众多，分析模型预测土壤应力的准确性仍受制于集中系数取值[24]。本文基于 ΠSTC 公式，建立加载环境与集中系数关系的基础上，提供了集中系数取值的方法，并较为准确地预测了压实过程中的土壤应力变化，为下阶段开展土壤应力引起土壤形变的力学过程研究提供了技术基础。

5　结论

（1）在田间原位土壤条件下，应力传递系数仍稳定可测，其数值等于压板–土壤接触面表面应力 σ_z 与土壤应力 σ_0 拟合曲线的斜率，且应力传递系数与压板–土壤接触面当量半径无关，并随土层厚度的增加而减小。

（2）基于分析模型推导了 ΠSTC 公式，以多层土壤应力传递系数连乘方式求解田间土壤应力传递系数，验证了田间原位不同深度土壤应力传递系数计算的可行性。

（3）集中系数受轮胎–土壤接触面当量半径与土层厚度的综合影响，可由应力传递系数计算获取。

（4）基于 ΠSTC 公式，分析模型较为准确地预测了压实过程中的土壤应力变化。

参　考　文　献

[1] 王宪良，王庆杰，李洪文，等. 基于 FRIDA 模型的轮胎–土壤接触特性研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(9)：121－127.
WANG Xianliang，WANG Qingjie，LI Hongwen，et al. Research on contact properties of soil－tyre based on FRIDA model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(9)：121－127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160918&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.018.(in Chinese)

[2] LEDERMÜLLER S，LORENZ M，BRUNOTTE J，et al. A multi-data approach for spatial risk assessment of topsoil compaction on arable sites[J]. Sustainability，2018，10(8)：1－22.

[3] PULIDO-MONCADA M，MUNJHOLM L J，SCHJØNNING P. Wheel load，repeated wheeling，and traction effects on subsoil compaction in northern Europe[J]. Soil and Tillage Research，2019，186：300－309.

[4] SELVADURAI A P S. On Fröhlich's solution for Boussinesq's problem[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics，2014，38(9)：925－934.

[5] 迟仁立，左淑珍，夏平，等. 不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响[J]. 农业工程学报，2001，17(6)：39－43.
CHI Renli，ZUO Shuzhen，XIA Ping，et al. Effects of different level compaction on the physicochemical characteristerics of soil and crop growth [J]. Transactions of the CSAE，2001，17(6)：39－43.(in Chinese)

[6] 孙忠英，李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J]. 农业机械学报，1998，29(3)：173－175.
SUN Zhongying，LI Baofa. Effect of agricultural machine walking device on soil compaction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，1998，29(3)：173－175.(in Chinese)

[7] 张家励，傅潍坊，马虹. 土壤压实特性及其在农业生产中的应用[J]. 农业工程学报，1995，11(2)：17－20.
ZHANG Jiali，FU Weifang，MA Hong. The soil compactive characteristics and their application in agriculture production [J]. Transactions of the CSAE，1995，11(2)：17－20.(in Chinese)

[8] 张兴义，隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报，2005，36(10)：161－164.
ZHANG Xingyi，SUI Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2005，36(10)：161－164.(in Chinese)

[9] DÉFOSSEZ P，RICHARD G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation[J]. Soil and Tillage Research，2002，67(1)：41－64.

[10] 陈浩，杨亚莉. 土壤压实模型分析[J]. 农机化研究，2012，34(1)：46－50.
CHEN Hao，YANG Yali. Analysis of soil compaction models[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2012，34(1)：46－50.(in Chinese)

[11] 王宪良，王庆杰，李洪文，等. 农业机械土壤压实研究方法现状[J]. 热带农业科学，2015，35(6)：72－76.
WANG Xianliang，WANG Qingjie，LI Hongwen，et al. Current research status of soil compaction by agriculture machinery [J].

Chinese Journal of Tropical Agriculture,2015, 35(6): 72 - 76. (in Chinese)
[12] ABU-HAMDEH N H, REEDER R C. Measuring and predicting stress distribution under tractive devices in undisturbed soils [J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(4): 493 - 502.
[13] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge[J]. Biosystems Engineering, 2018, 169: 199 - 208.
[14] 李汝莘,林成厚,高焕文,等. 小四轮拖拉机土壤压实的研究[J]. 农业机械学报, 2002,33(1): 126 - 129.
LI Ruxin, LIN Chenghou, GAO Huanwen, et al. Prediction of soil compaction by small tractor using finite element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 126 - 129. (in Chinese)
[15] 赵振家,邹猛,薛龙,等. 压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 311 - 313.
ZHAO Zhenjia, ZOU Meng, XUE Long, et al. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 311 - 313. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2012s63&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.063. (in Chinese)
[16] ARVIDSSON J, TRAUTNER A, VAN DEN AKKER J J H, et al. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden: II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60(1): 79 - 89.
[17] KELLER T, DÉFOSSEZ P, WEISSKOPF P, et al. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 391 - 411.
[18] NAWAZ M F, BOURRIÉ G, TROLARD F. Soil compaction impact and modelling. a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(2): 291 - 309.
[19] RÜCKNAGEL J, HOFMAN B, DEUMELANDT P, et al. Indicator based assessment of the soil compaction risk at arable sites using the model REPRO[J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 341 - 352.
[20] TRAUTNER A. On soil behaviour during field traffic [D]. Upssala: Sveruges Lantbruksuniv, 2003.
[21] VAN DEN AKKER J J H. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 113 - 127.
[22] FRÖHLICH A, ZAK E. Pressure distribution in the subsoil [J]. Naunyn-Schmiedebergs Archiv für Experimentelle Pathologie und Pharmakologie, 1934, 177(1): 103 - 112.
[23] SÖHNE W. Distribution of pressure in the soil and soil deformation under tractor tires[J]. Grundl. Landtech., 1953, 5: 49 - 59.
[24] HE T, DING Q, LI Y, et al. Stress transmission coefficient: a soil stress transmission property for a loading process[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 179 - 184.
[25] SMITH R, ELLIES A, HORN R. Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire loading[J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(4): 207 - 222.
[26] HORN R, FLEIGE H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 73(1): 89 - 99.
[27] KELLER T, LAMANDÉ M. Challenges in the development of analytical soil compaction models [J]. Soil and Tillage Research, 2010, 111(1): 54 - 64.
[28] RAM R B. Pressure measurement in the soil under the load[J]. Soil and Tillage Research, 1984, 4(2): 137 - 145.
[29] LAMANDÉ M, SCHJØNNING P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 57 - 70.
[30] LAMANDÉ M, SCHJØNNING P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: effect of tyre size, inflation pressure and wheel load[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 71 - 77.
[31] LAMANDÉ M, SCHJØNNING P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part Ⅲ: effect of soil water content[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 78 - 85.
[32] 贺亭峰,丛文杰,ADAM Belaleisa,等. 基于压实分析模型的土壤应力传递系数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 59 - 65.
HE Tingfeng, CONG Wenjie, ADAM Belaleisa, et al. Soilstress transmission coefficient based on compaction analytical model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 59 - 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170607&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.007. (in Chinese)
[33] KELLER T, BERLI M, RUIZ S, et al. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: comparing measurements with simulations[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 106 - 117.
[34] LAMANDÉ M, GREVE M H, SCHJØNNING P. Risk assessment of soil compaction in Europe - Rubber tracks or wheels on machinery[J]. CATENA, 2018, 167: 353 - 362.
[35] 柏建彩,丁启朔,陈青春,等. 农田原状土壤压实测试系统的设计及操作方法[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 368 - 370.
BO Jiancai, DING Qishuo, CHEN Qingchun, et al. Undisturbed soil compaction test system design and operation method in farmland [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(1): 368 - 370. (in Chinese)
[36] 张维强,鲁植雄. 水田土壤圆锥指数测量间距合适值的确定研究[J]. 农机化研究, 1999,21(4): 68 - 70.
ZHANG Weiqiang, LU Zhixiong. Determination of the suitable value of cone index measurement space in paddy field [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1999, 21(4): 68 - 70. (in Chinese)
[37] 丁启朔,柏建彩,陈青春,等. 土压力传感器安装加载测试装置: 203337473U[P]. 2013 - 12 - 11.
[38] 陈青春,柏建彩,丁启朔,等. 土压力传感器安装加载测试装置及其操作方法: 103278395A[P]. 2013 - 09 - 04.
[39] 柏建彩. 使用土压力传感技术的水稻土应力传递特性研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
BO Jiancai. Stress transmission of paddy soil with soil stress sensors [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
[40] DAVE T N, DASAKA S M. In-house calibration of pressure transducers and effect of material thickness[J]. Geomechanics & Engineering, 2013, 5(1): 1 - 15.
[41] 李春林,丁启朔,陈青春. 水稻土的先期固结压力测定与分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 141 - 144.
LI Chunlin, DING Qishuo, CHEN Qingchun. Measurement and analysis of precompression stress of soil in rice field [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 141 - 144. (in Chinese)