

DOI: 10.11779/CJGE201605009

模型试验中膜式土压力盒标定及其应用

芮 瑞, 吴端正, 胡 港, 徐路畅, 夏元友

(武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 土工模型试验和现场试验中常采用膜式土压力盒作为压力测试元件, 即通过测量膜的变形(挠曲)量获取压力值。膜式土压力盒作为埋入介质内部的测试元件, 由于土压力盒与岩土介质的刚度差, 测试中受到由差异变形导致的岩土介质土拱效应的影响, 特别是模型试验的应力历史也会产生不同程度的土拱效应影响。针对桩承式路堤多陷阱门模型试验中的加卸载条件, 采用相同的试验用砂在相同的相对密度条件下进行了1组加载标定和4组不同填料高度下的卸荷标定试验。结果显示, 加载曲线线性较好, 而卸载曲线可采用指数曲线来进行拟合。将获取的标定系数应用于桩承式路堤多陷阱门模型试验当中, 发现填料填筑过程中采用砂标系数处理得到的平均土压力值与路堤自重应力较为吻合。在陷阱门下沉模拟桩间土下沉过程中, 分别采用砂标加载系数和卸荷系数处理土压力数据, 与实际情况能够较好的吻合。

关键词: 膜式土压力盒; 土拱效应; 标定试验; 陷阱门试验; 桩承式路堤

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0837-09

作者简介: 芮 瑞(1981-), 男, 安徽黄山人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程加固设计与理论、软土地基处理方面的研究与教学工作。E-mail: r.rui@whut.edu.cn。

Calibration tests on diaphragm-type pressure cells

RUI Rui, WU Duan-zheng, HU Gang, XU Lu-chang, XIA Yuan-you

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Diaphragm-type pressure cells are often used in geotechnical model tests and in-situ tests. The soil pressures are obtained through the measurement of the diaphragm deflection. With a gauge inserted into the soil or sand, the stiffnesses of the cells and the geo-medium are different. The soil arching in the soil or sand above the cells caused by the differential deformation will reduce the pressure on the diaphragm. In addition, different stress histories in the model tests result in different levels of influence. In the piled embankment multiple trapdoors model tests, the cells on the pile (fixed beams) experience a loading process, while the cells in the soil (movable beams) experience an unloading process. One loading calibration test and four unloading calibration tests are carried out on the same sand under the same relative density as in the model tests. The calibration results show that the stress-strain loading curves are almost linear and the unloading curves are quite similar to exponential ones. The calibration coefficients are obtained and then used to deal with the measurements. During the sand filling procedure, the average pressures obtained using the calibration coefficients coincide well with the self-weight of the embankments. During the settling (trapdoor movement) procedure, the pressures of the cells on the pile and in the soil are calculated using loading coefficients and unloading coefficients respectively. The results show that the soil pressure curves coincide well with those in the real model tests.

Key words: diaphragm-type pressure cell; soil arching; calibration test; trapdoor test; piled embankment

0 引 言

膜式土压力盒作为一种测量土压力的特殊压力传感器, 通常需要将其埋入土介质中, 通过与土介质的变形协调, 对土压力进行测量。在现场试验和模型试验中, 一般采取两种不同感应方式的土压力盒, 分别为振弦式土压力盒和电阻应变片式土压力盒。这两种类型的土压力盒采集的数据分别为频率和电压, 因而

有着不同的工作原理。韩焯等^[1]在大型群桩基础静载试验中, 通过带沥青囊的土压力盒观测群桩承台底反力, 完成了单桩、三桩、六桩载荷试验, 并获得比较

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208403); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(WUT: 2013-II-018); 武汉理工大学国家级大学生创新创业训练计划项目(20151049706038)

收稿日期: 2015-04-27

全面可靠的数据。朱才辉等^[2]以吕梁机场黄土高填方试验段为研究对象,在沟底地基中部开挖标定槽并埋设振弦式土压力盒,分析黄土高填方地基中的土压力量测技术及其空间分布规律,探讨其土压力的计算方法及与理论土压力存在差异的根源。黄银冰等^[3]在淤泥土地基中的三洋港挡潮闸工程现场水平静载荷试验中,将土压力盒埋入桩侧土体中,测试在水平荷载下桩周土体的土压力分布规律。张延军等^[4]基于江苏射阳港风电项目,通过在风机基础底板下埋设土压力盒,测算风机基础从风机施工至正常运行过程中的基底土压力分布。陈雪华等^[5]采用土压力盒对铁路桥台背土压力进行长时间观测,分析了土压力分布规律。模型试验方面,徐光明等^[6]在研究地下连续墙的侧向土压力分布的离心模型试验中,通过型号为 BW-3 电阻应变式土压力盒的测试结果,获得了合理的侧压力系数。雷文杰等^[7]在沉埋桩加固滑坡体模型试验中,在测试桩前后、沿滑体高度方向上、以及桩顶以上不同位置各点布置土压力盒,监测土压力及其变化。闫金凯等^[8]在独立微型桩与滑坡相互作用的大型物理模型试验中,于微型测试桩桩前、桩后沿竖直方向埋设土压力盒,量测微型桩的受力情况。蒋明镜等^[9]在其设计的静力触探模型箱试验装置中,研究 TJ-1 模拟月壤垂直静力触探过程,通过沿模型箱深度方向埋设土压力盒测量探杆周围水平土压力的变化。无论采用振弦式还是电阻式土压力盒,都是通过测量弹性膜片挠曲变形来获得土压力值。其测试影响因素都是相似的,本文主要对模型试验中经常采用的电阻式膜式土压力盒进行研究。

土压力盒测试对膜式土压力盒结构是存在一定要求的,Weiler 等^[10]曾提出影响土压力盒工作特性的一些因素,包括土压力盒直径与厚度比、膜片挠曲变形比率、感应区面积与总面积比、土压力盒安装方位等。同时给出直径与厚度的比值应大于 5;在实际的测量中,当直径与厚度的比值越大,其测量的结果也就更精确;以及膜片的直径与膜片挠度变形的比值应大于 2000~5000。Daigle 等^[11]提出,土压力盒工作与温度的变化有关系,当加载量大,土压力盒的量程小时,温度的影响显著。曾辉等^[12]提出为了消除介质不均匀所引起的压力差别,建议传感器敏感面的直径要大于土介质最大颗粒粒径的 50 倍。减小感应区直径与土压力盒外膜直径之比 d/D ,有利于提高传感器敏感部分的等效弹模,减小结构表面压力传感器埋置误差影响。目前一般在 $0.32 < d/D < 1.0$ 范围内选取。

Weiler 等^[10]还指出,在试验测试相同的条件下进行土压力盒的标定是至关重要的。这些条件包括试验

中介质(砂土)的粒径、砂土的相对密度、动态加载的影响以及环境的条件(包括湿度及温度的影响)。另外,还需要关注应力历史的影响,Zhu 等^[13]和 Talesnick^[14]研究发现在逐级卸荷过程中,土压力曲线出现显著的滞后现象。

然而,这些问题还没有引起足够重视。在现场试验中,由于土压力盒使用量较大及监测单位工作要求不严,土压力数据还基本采用出厂标定参数或者气(液)压标定参数。模型试验中,即便在采用相同的测量介质中进行了标定,但往往对标定用砂的相对密度、试验装置侧壁摩阻力等试验条件的控制不够严格。对土压力盒加载过程、卸载过程往往采用统一标定系数,也没有区分卸载中不同先期卸荷压力对标定系数的影响,给测试结果带来了较大的误差。在对土压力盒的在介质中的受力特性进行分析的基础上,以桩承式路堤多陷门试验为例,分加载情况和 4 种不同填料高度下的卸载情况,对试验采用的电阻式土压力盒分别进行了标定,获取了相关参数并应用到模型试验数据处理当中。

1 膜式土压力盒在介质中的受力

膜式土压力盒的测试原理决定了测试膜片相对于介质要更柔。在压力作用下,膜片容易产生变形,导致应力向刚度较大的土压力盒两侧集中。膜式土压力盒在流体标定中的受力与其在砂中的受力如图 1 所示。

(1) 流体中压力处处相等,作用在土压力盒上膜的荷载为均布力。

(2) 由于砂颗粒介质中存在的土拱效应,使得原始应力状态遭到破坏,造成应力的重分布。土压力盒膜片上两侧应力大,中间小,造成测量值偏小。

(3) 不仅如此,在卸载时,由于砂中土拱效应产生的颗粒剪切的不可回复性,卸载时薄膜上作用的荷载也不会立即卸除,而是存在滞后效应。同时,这种滞后效应的大小受先期卸荷压力的影响。

与单膜土压力盒相比,双膜土压力盒在结构上相当于在单膜土压力盒的膜片(二次膜)外部加了一层中央带有“活塞”状刚性块环状膜片(一次膜),并在两层膜片之间的空腔填充密封液体,构成活塞—液腔传压的双膜结构。因此,双膜活塞板产生的变形是平移而不是挠曲。张立祥等^[15]曾指出提出单膜土压力传感器模量明显高于双膜土压力传感器,采用双膜传感器最大变形量减小,有助于减小土拱效应的影响。但是仍然不能从根本上消除土拱效应的影响。

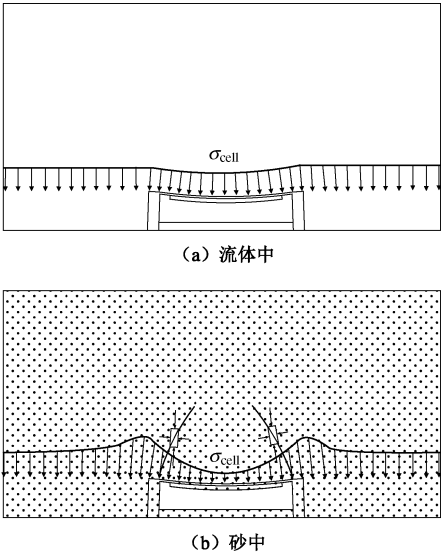


图 1 膜式土压力盒在流体与砂中的受力状态对比

Fig. 1 Stress states of diaphragm-type pressure cells in liquid and sand

Talesnick^[16]提出了一种解决方案并建立了一套“零变形”膜式土压力测试系统, 该系统由一套土压力盒应变测试部件和一套气压加压与测量部件组成。气压加压与测量部件与土压力盒内部空气相连通。同时, 应变测试部件与气压加压与测试部件通过循环算法软件自动控制。该土压力测试系统工作过程如下: 当监测到应变超过某一微量时, 通过气压进行补偿以抵消膜片应变, 从而实现膜片的零应变。该系统可以有效地解决不同介质刚度的土拱效应和应力历史影响。但该系统对试验设备和操作要求较高, 不太适用于现场监测和间隔时间观测。目前来看, 在试验中通过精细标定以获得土压力盒的标定系数是一种现实可行的途径。

2 模型试验设置

课题组自主研发的多功能土工模型试验箱装置(见图 2)用于桩承式路堤试验^[17]。该试验箱装置由砂箱、加载组件和挡板下移组件组成, 砂箱内部尺寸 1200 mm×800 mm×300 mm (长×高×宽), 最大填筑高度为 800 mm。其中下部挡板包括 16 块钢活动挡板, 每块钢活动挡板均可以固定在试验箱外框上(模拟桩)或通过长螺栓与下方的厚钢板相连并产生均匀下沉(模拟桩间土下沉), 通过升降机与百分表精确地控制下移量。通过调整下部挡板中活动挡板和固定挡板的位置可模拟 20 种以上的桩宽、桩间距组合。固定于钢活动板上的微型土压力盒是主要的应力测试原件。

桩承式路堤模型试验采用正交设计, 共 16 组。填

土高度分别为 150, 300, 450, 600 mm。土压力盒测试系统用于同步测试作用于砂箱底部的土压力。其中 4 种不同填高的试验土压力盒布置见图 3。

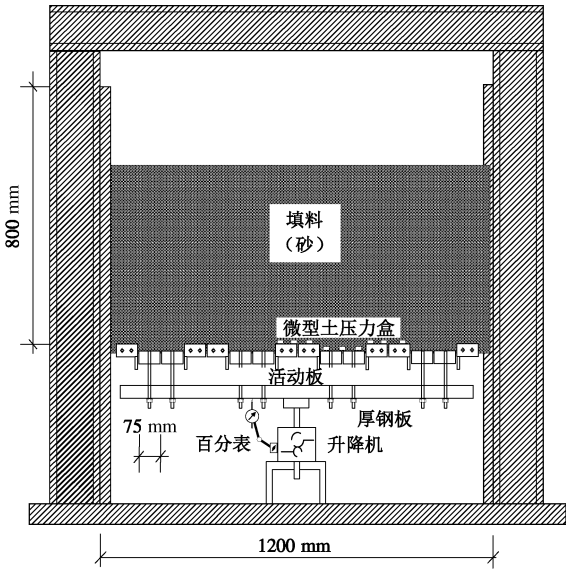


图 2 桩承式路堤模型试验装置图

Fig. 2 Apparatus of piled embankments model tests

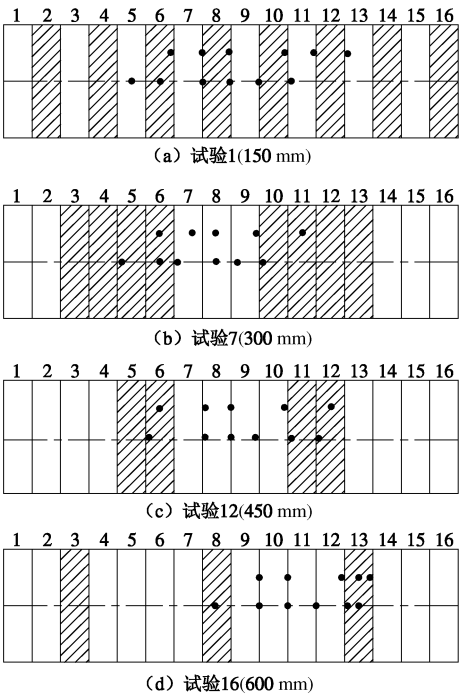


图 3 土压力盒平面布置图(其中阴影为固定板, 空白为活动板)

Fig. 3 Arrangement of soil pressure cells (shaded beams represent fixed beams and white beams represent movable beams)

试验所采用的膜式土压力盒见图 4 所示。该土压力盒直径 $\phi 28$ mm 厚度 5 mm, 膜厚为 0.28 mm, 材料为高强度铝合金。采用温度自补偿应变花 BF-350-20KA-23, 其电阻为 350 Ω , 直径为 $\phi 20$ mm。测试范围 0~50 kPa, 分辨率 0.03 kPa。微型土压力盒

的出厂系数在气压中标定获得。一般来说，膜式土压力盒在测试过程中均会发现其相对于在流体中标定结果出现读数偏小的情况。为了获得更为准确的土压力值，需要将土压力盒在砂中重新标定。

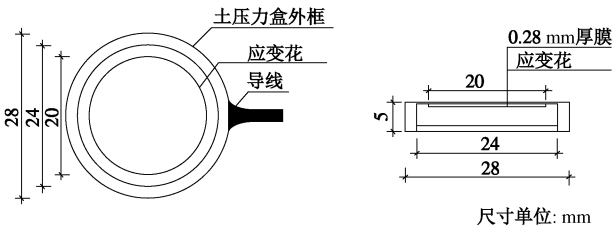


图 4 膜式土压力盒构造

Fig. 4 Construction of diaphragm-type pressure cells

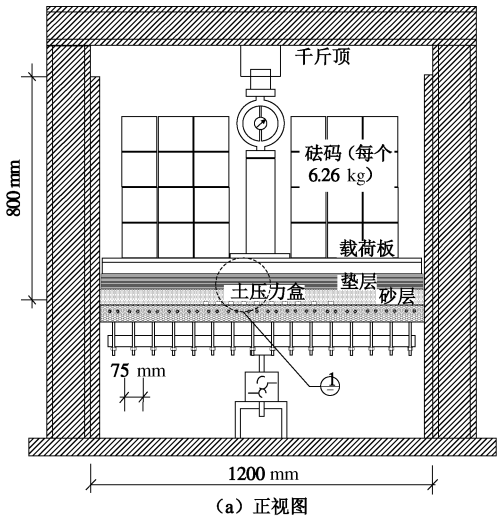
由于模型试验拟采用 150, 300, 450, 600 mm 这 4 种不同的填土高度。在钢活动板下沉过程中，活动板上的土压力处于卸荷状态。而固定板上的土压力由于土拱效应的发展，压力逐渐增大。因此，开展了 1 组加载标定试验（最大加载量设为 30 kPa）和 4 组卸载试验（先期压力分别设定为 150, 300, 450, 600 mm 填土高度对应的压力）。

3 土压力盒标定试验设置

土压力盒测试拟在模型试验箱中进行以保证与模型试验相同的试验环境与尺寸条件，并采用与模型试验相同的砂及相对密实度 ($D_r=85\%$) 作为标定试验用砂。为了消除侧壁摩阻力的影响，需要对原模型试验装置进行减摩处治，并添加加载装置与荷载传递层（减少应力集中以及确保柔性加载）。见图 5。

3.1 减摩措施

标定试验的减摩措施见图 5 (d) 所示。模型试验箱内壁依次涂抹 1 层硅油、2 层特氟龙膜（厚 0.5 mm）、特氟龙膜之间夹石墨粉，试验照片见图 6 (a)。特氟龙膜使用透明胶条粘贴在砂箱侧壁，砂层等放置好以后将胶条撕除，使得特氟龙膜能够自由移动。



(a) 正视图

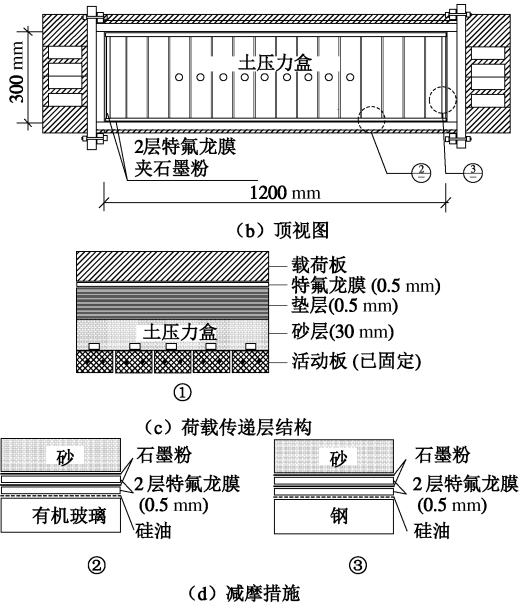


图 5 标定试验试验箱设置图

Fig. 5 Test set-up of calibration tests

3.2 加载系统

卸荷标定试验的加载系统由一个木质载荷板和若干砝码组成，每个砝码质量为 6.26 kg。与填土高度 150, 300, 450, 600 mm 等重的砝码被均匀、对称的置放在 50 mm 厚的木质载荷板上。卸载过程通过对称取出砝码来实现。

加载标定试验时，最大加载量设定为 30 kPa (1102.04 kg)。加载系统由一个钢质载荷板与一个带连杆的千斤顶组成。

3.3 荷载传递层

荷载传递层由 1 层特氟龙膜、1 层 50 mm 厚垫层以及 1 层 30 mm 厚砂层组成，见图 5 (c)。

特氟龙膜的目的是防止承载板与垫层之间的摩擦力形成侧限而引起的荷载分布不均。

垫层选取了 3 种不同的材料进行试验，见图 6(b)，分别为橡胶泡沫 (EPDM)，聚氨酯泡沫 (PU)，氢化丁腈橡胶 (HNBR)。

试验结果证明，在试验所采用的最大荷载下，PU 泡沫垫强度不足，EPDM 和 HNBR 垫均能很好的支撑，但 HNBR 垫硬度过大，EPDM 橡胶泡沫垫层不仅最软，且具有一定可塑性。因此，在 4 组卸载试验与 1 组加载试验中均采用 EPDM 橡胶泡沫垫层。

模型试验中，无论哪种粒径的砂，土压力盒上均覆盖一层 0.25~0.425 mm 粒径的砂。因此，标定试验的砂层用砂采用 0.25~0.425 mm，砂层厚度应尽量采用较小的厚度以最大程度的消除“有害”效应，即试验箱宽度方向土拱效应影响^[18]。但为了保证标定试验中的土压力盒受力状态与模型试验中的受力状态一致。必须保证一定的砂层厚度，标定试验中取 1.5 倍

土压力盒直径 (30 mm)。

使用土压力盒出厂气压标定系数计算得到加载过程中的土压力, 见图 7。可以看到采用 EPDM 橡胶泡沫垫获得了较为均匀的应力分布, 加载量 30 kPa 时, 采用出厂标定计算的土压力分布最大差值仅为最大值的 9%。同时也可以看到, 当采用出厂标定系数时, 计算得到的土压力数值小于加载值, 平均约为加载值的 70%。也反映出土压力盒顶部土拱效应对土压力的消减。



(a) 砂箱减摩措施与土压力盒布置



(b) 3 种垫层 (从上到下 EPDM、PU 和 HNBR)

图 6 试验设置照片

Fig. 6 Photos of test set-up

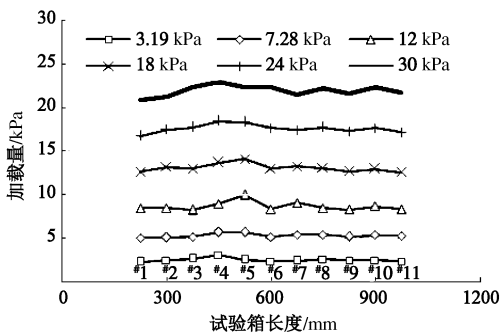


图 7 采用出厂标定计算得到的土压力分布

Fig. 7 Distribution of soil pressure obtained using factory calibration coefficients

4 标定试验结果

在加载标定试验中, 首先通过均匀添加砝码质量达到 377.06 kg (10.26 kPa) 以保证加载板平衡, 随后通过千斤顶进行加载。加载过程中, 每施加约 2 kPa 记录 1 次土压力盒读数。

4 组卸荷标定试验分别采用砝码块加载至 88.26, 176.52, 264.78, 353.04 kg。然后将砝码块从砂箱中

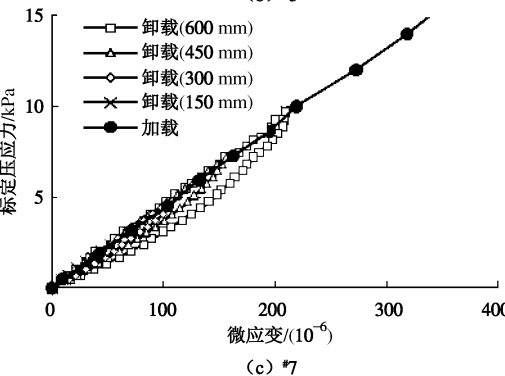
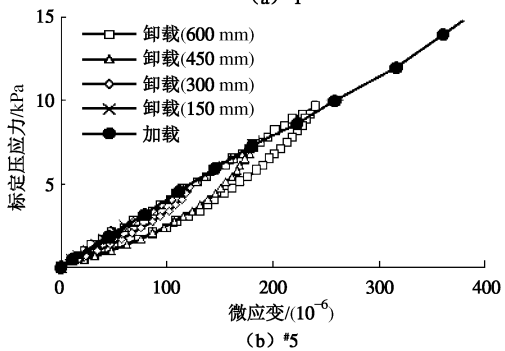
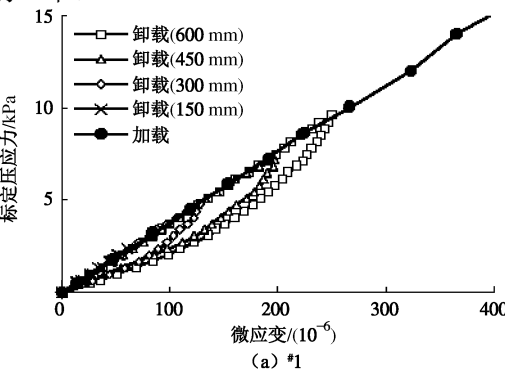
取出以模拟卸荷过程。每添加或取出 2 块砝码, 即记录 1 次土压力盒读数。试验照片见图 8。



图 8 标定试验照片

Fig. 8 Photo of calibration tests

试验获得的土压力盒的加载标定试验与卸载标定试验曲线见图 9。限于篇幅, 图中列出了 11 个土压力盒中的 4 个。



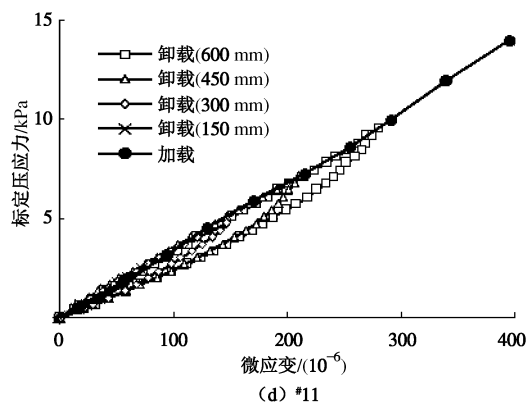


图9 土压力盒加载试验与卸载标定试验曲线

Fig. 9 Loading test and unloading calibration curves

从图9可以看到,加载试验标定曲线均表现出很好的线性。拟合线性公式为

$$\sigma = K \cdot V \quad (1)$$

式中, V 为静态应变仪输出数据 (微应变)。

图9的卸载试验曲线显示出与Zhu等^[13]和Talesnick^[14]中指出的滞后性质。图9中还可以看到,先期压力较小时,曲线弯曲程度越低,越接近于直线。这是由于先期压力较小时,膜片挠曲变形小,卸荷时介质具有一定的回弹恢复能力。该现象也说明刚度较大的厚膜片可以减小膜片挠曲变形,因此适当采用量程较大的膜式土压力盒可以减小曲线滞后情况。Zhu等^[13]的试验中也揭示了这一现象。

Zhu等^[13]在对试验数据进行标准化之后,采用双指数曲线来拟合土压力盒卸载曲线:

$$\sigma / \sigma_{\max} = y_0 + A_1 \cdot e^{(V/V_{\max} - x_0)/t_1} + A_2 \cdot e^{(V/V_{\max} - x_0)/t_2} \quad (2)$$

式中, σ 和 σ_{\max} 表示当前应力和初始卸荷应力; V 和 V_{\max} 分别对应于 σ 和 σ_{\max} 的土压力盒读数; y_0 , A_1 , A_2 , x_0 , t_1 和 t_2 为6个待定系数; 本文采用单指数公式进行拟合; 待定系数减为 y_0 , A_1 , x_0 和 t_1 。经过标准化的土压力数据和拟合曲线见图10。

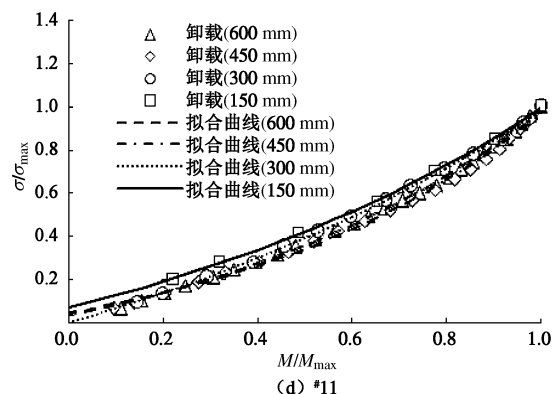
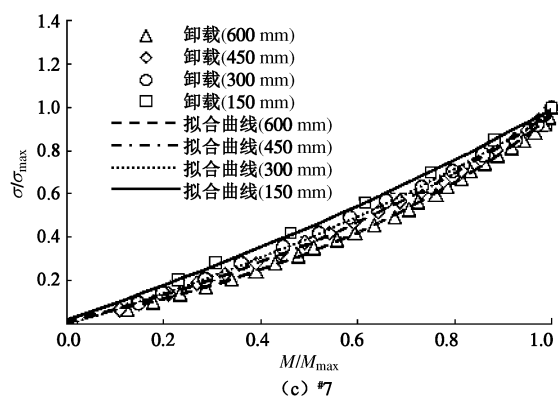
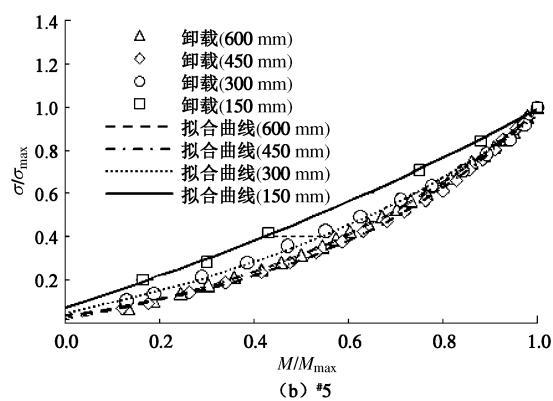
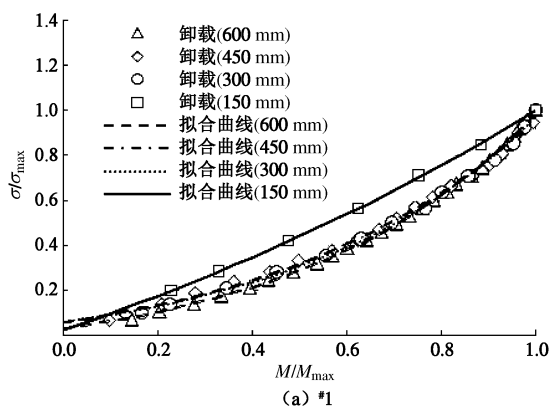


图10 土压力盒卸载标定与拟合曲线

Fig. 10 Unloading calibration and fitting curves

从图10中可以看到,采用单指数曲线对卸载试验结果进行拟合也能够获得理想的结果,待定系数减少为4个。在模型试验中,对于固定挡板上的土压力盒采用加载线性标定系数,对于活动板上的土压力盒采用了4参数卸载标定系数,并且对于不同的填料高度,选用不同的系数值。

通过拟合得到的各土压力盒加载系数和卸载标定系数见表1。与砂标参数相比,出厂气标参数普遍要低20%~30%。从而解释了图7中采用气标参数计算的土压力与填土荷载相比出现了减少的情况。

表 1 土压力盒标定系数汇总表							
Table 1 Calibration coefficients							
编号	加载系数 K		先期 填高/mm	卸载参数			
	$K_{\text{砂}}$	$K_{\text{气}}$		y_0	A_1	x_0	t_1
#1	0.038	0.026	150	-1.221	1.053	-0.288	1.731
			300	-0.083	0.436	0.560	0.501
			450	-0.129	0.467	0.525	0.564
			600	-0.123	0.450	0.545	0.507
#5	0.041	0.032	150	-1.182	1.054	-0.319	1.822
			300	-0.295	0.574	0.395	0.774
			450	-0.112	0.447	0.549	0.500
			600	-0.217	0.513	0.475	0.616
#7	0.046	0.033	150	-1.532	1.201	-0.533	2.065
			300	-0.992	0.931	-0.094	1.471
			450	-0.549	0.707	0.231	1.000
			600	-0.290	0.557	0.419	0.719
#11	0.034	0.025	150	-0.476	0.692	0.235	1.018
			300	-0.755	1.602	0.904	1.209
			450	-0.225	1.355	1.088	0.677
			600	-0.319	1.399	1.060	0.771

注: 限于篇幅, 以#1, #5, #7, #11 为例。

5 土压力盒测试应用

5.1 填料填筑过程的土压力数据处理结果

采用本文的标定结果对加载过程中的土压力数据进行处理。以填土高度为 150 mm 的试验 1 和填土高度为 600 mm 的试验 16 为例, 分别采用砂标系数 $K_{\text{砂}}$ 和气标参数 $K_{\text{气}}$ 对测试结果进行处理, 数据结果与填料自重压力对比见图 11, 12。

图 11, 12 反映出与图 7 相似的结论, 即采用气标加载系数 $K_{\text{气}}$ 处理填料加载的土压力值偏小。试验 1 和试验 16 中, 采用 $K_{\text{气}}$ 得到的结果平均比采用 $K_{\text{砂}}$ 得到的结果均低 27 %。

与填料自重应力 W 相比, 试验 1 中采用 $K_{\text{砂}}$ 处理得到的平均土压力与自重应力 W 值基本吻合, 而采用 $K_{\text{气}}$ 处理得到的平均土压力比 W 值小 28 %; 而填料高度为 600 mm 的试验 16, 采用 $K_{\text{砂}}$ 处理得到的平均土压力也比自重应力 W 值小 17%, 而采用 $K_{\text{气}}$ 处理得到的平均土压力比 W 值小 39 %。反映了模型试验中侧壁(主要为模型试验箱前后挡板)的摩擦力影响。这是由于模型试验中为了直接观察陷阱门试验中颗粒位移情况而没有设置减摩措施造成的。可以将 $K_{\text{砂}}$ 处理得到的平均土压力与 W 的差值算作摩擦力。填料高度较小时, 摩擦力几乎为 0, 这主要与采用的分层填筑(每层 25 mm)、分层振捣有关, 振动传递深度范围内的摩擦力基本得以消除, 当填土高度超过 150 mm 时, 由于填筑效率的关系, 将分层厚度增加到 50 mm 一层, 可能也造成摩擦力加速聚集。

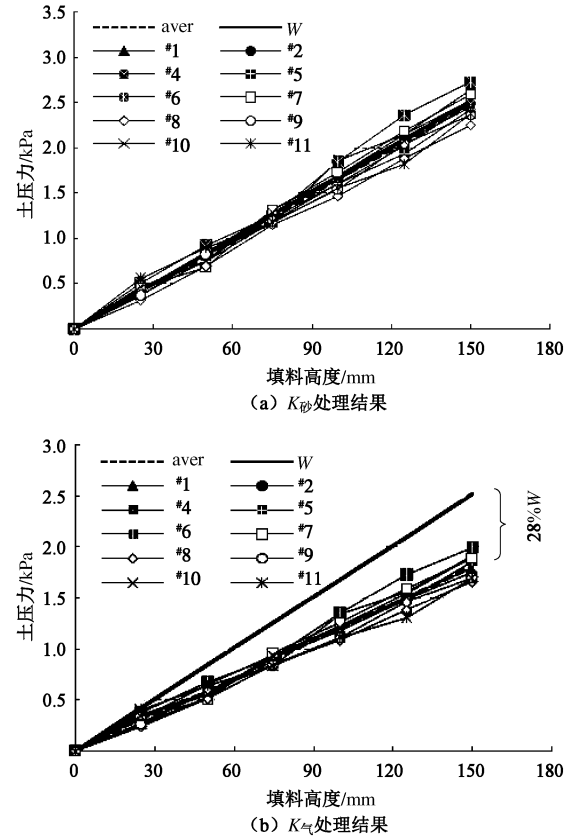


图 11 试验 1 加载过程土压力曲线(填土高度 150 mm)
Fig. 11 Variation of soil pressures during filling procedure of test 1 (fill height = 150 mm)

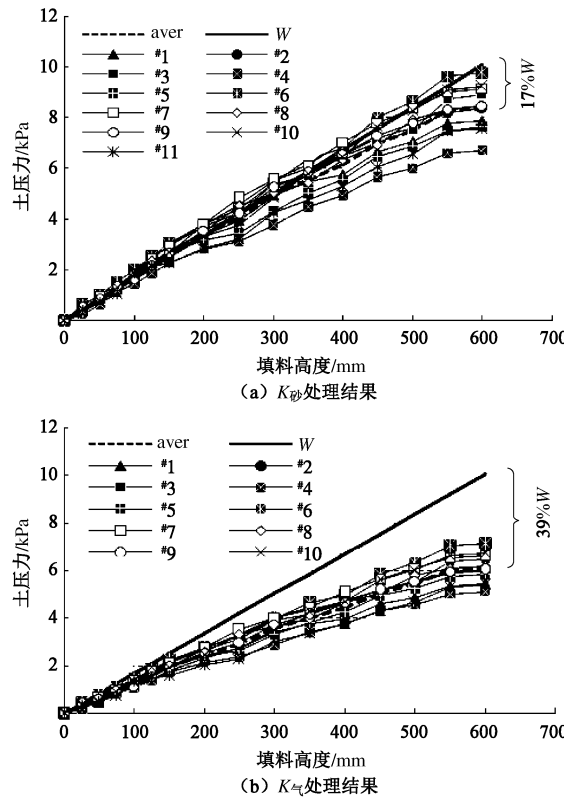


图 12 试验 16 加载过程土压力曲线(填土高度 600 mm)
Fig. 12 Variation of soil pressures during filling procedure of Test 16 (fill height = 600 mm)

5.2 活动板下沉过程的土压力数据处理结果

当砂料填筑完毕后,为了模拟桩承式路堤桩间土下沉,通过位移装置下移活动板。固定板将承担由土拱效应发挥而增大的土压力,因此固定板上的土压力盒采用 $K_{\text{砂}}$ 进行处理。活动板上的土压力由于土拱效应的发挥出现降低,因此活动板上的土压力盒采用相应的先期填料高度对应的卸荷标定参数(见表1)。得到试验16中土压力随桩间土下沉的变化曲线见图13。

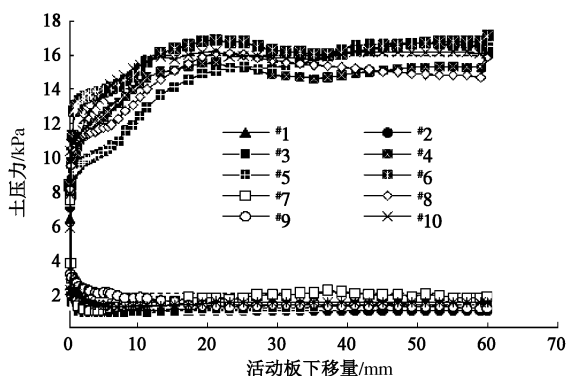


图13 活动板下沉过程中的土压力变化曲线

Fig. 13 Variation of soil pressures during settling of movable beams

如图13所示,随着活动板下沉,活动板上的土压力随即降低,而固定板上的土压力缓慢上升。在下沉量达到6 mm时活动板上的平均土压力达到最小值1.2 kPa,而固定板上的平均土压力则一直上升,直到下沉量达到22 mm时才达到最大值15.8 kPa。说明活动板下沉时,部分荷载首先传递到了侧壁上,转化成摩擦力。随着下沉的继续带来了扰动,才又转移到固定板上。测试数据是较为合理的。

6 结 论

膜式土压力盒应用于土工模型试验测量与现场试验中,但测试结果往往并不十分理想。这种测试结果的不理想与多种因素有关,除了自身尺寸与结构的影响以外,由于差异变形导致的土拱效应是导致测试误差的主因。因此,在相同的介质、相对密度以及应力历史条件下对土压力盒进行标定,并在试验中应用标定参数对于获取准确的试验数据显得尤为关键。

根据桩承式路堤多陷阱门模型试验的加载与卸荷应力历史,以及4种不同的填料高度。安排了1组加载标定试验和4组不同先期填料加载高度的卸荷标定试验。解决了利用模型试验装置进行标定试验时的侧壁摩擦阻力减摩与柔性加载问题。主要得到以下4点结论。

(1) 砂中土压力盒加载曲线与气压标定曲线类

似,均可近似的采用线性公式来进行拟合,在相对密度85%的砂中进行标定,气标系数要比砂标系数小20%~30%。

(2) 砂中土压力盒卸载曲线存在显著的滞后特性,即从先期填土荷载卸荷时,膜片应变不能够及时的回复,在相同的压力下卸荷过程测得的应变要大于加载过程的测试结果。

(3) 土压力盒卸荷曲线可采用6参数双指数曲线或4参数单指数曲线进行拟合。

(4) 模型试验中,采用相应砂及其相对密度条件下的加载标定系数,其获得的土压力与砂的自重应力较好的吻合。在陷阱门试验中,对活动板上卸荷条件下的土压力盒应用相应先期压力(填料高度)下的卸荷系数进行土压力数据处理与实际情况较好的吻合。

参考文献:

- [1] 韩 焯, 张乃瑞, 钟 和, 等. 大型群桩基础静载试验与测试中的关键问题[J]. 工程勘察, 2005(1): 10 - 14. (HAN Xuan, ZHANG Nai-rui, ZHONG He, et al. Key problems in the static loading tests of large-scale pile group foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(1): 10 - 14. (in Chinese))
- [2] 朱才辉, 李 宁, 袁继国. 黄土冲沟中高填方土压力量测及分布规律探讨[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 827 - 836. (ZHU Cai-hui, LI Ning, YUAN Ji-guo. Measurement and distribution of earth pressure of high fill in loess gully[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 827 - 835. (in Chinese))
- [3] 黄银冰, 赵恒博, 顾长存, 等. 考虑水泥土桩增强作用的灌注桩水平承载性能现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1109 - 1115. (HUANG Yin-bing, ZHAO Heng-bo, GU Chang-chun, et al. Field experimental study of lateral load capacity of filling pile enhanced by soil-cement pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1109 - 1115. (in Chinese))
- [4] 张延军, 木林隆, 钱建固, 等. 梁板式桩筏基础现场测试分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3253 - 3258. (ZHANG Yan-jun, MU Lin-long, QIAN Jian-gu, et al. Field test of piled beam-slab foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3253 - 3258. (in Chinese))
- [5] 陈雪华, 律文田, 王永和. 桥台台背土压力的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1407 - 1410. (CHENG Xue-hua, LÜ Wen-tian, WANG Yong-he. Experimental research of earth pressure behind bridge abutment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1407 - 1410. (in Chinese))
- [6] 徐光明, 陈爱忠, 曾友金, 等. 超重力场中界面土压力的测量[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2671 - 2674. (XU

- Guang-ming, CHEN Ai-zhong, ZENG You-jin, et al. Measurement of boundary total stress in a multi-gravity environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2671 - 2674. (in Chinese))
- [7] 雷文杰, 郑颖人, 王恭先, 等. 沉埋桩加固滑坡体模型试验的机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1347 - 1355. (LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, WANG Gong-xian, et al. Mechanism analysis of slope reinforcement with deeply buried piles with model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1347 - 1355. (in Chinese))
- [8] 闫金凯, 殷跃平, 马 娟. 滑坡防治独立微型桩性状的大型物理模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, **39**(4): 55 - 60. (YAN Jin-kai, YIN Yue-ping, MA Juan. Large scale model test study on single micropile inlandslide reinforcement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, **39**(4): 55 - 60 (in Chinese))
- [9] 蒋明镜, 戴永生, 王新新, 等. 一种静力触探模型箱试验装置的研制及其试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 2109 - 2117. (JIANG Ming-jing, DAI Yong-sheng, WANG Xin-xin, et al. Development of a calibration chamber for cone penetration test and corresponding experimental research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 2109 - 2117. (in Chinese))
- [10] WEILER W A, KULHAWY F H. Factors affecting stress cell measurements in soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, **108**(12): 1529 - 1548.
- [11] DAIGLE L, ZHAO J Q. The influence of temperature on earth pressure cell readings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(3): 551 - 559.
- [12] 曾 辉, 余尚江. 岩土应力传感器设计和使用原则[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(1): 93 - 98. (ZENG Hui, YU Shang-jiang. Design and use policy of stress sensors in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(1): 93 - 98. (in Chinese))
- [13] ZHU B, JARDINE R J, FORAY P. The use of miniature soil stress measuring cells in laboratory applications involving stress reversals[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(5): 675 - 688.
- [14] TALESNICK M. Measuring soil pressure within a soil mass[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(7): 716 - 722.
- [15] 张立祥, 罗 强, 张 良, 等. 土压力传感器在硬土介质中的非线性响应分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3633 - 3640. (ZHANG Li-xiang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis of nonlinear response of soil pressure transducer in high-modulus soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3633 - 3640. (in Chinese))
- [16] TALESNICK M. Measuring soil contact pressure on a solid boundary and quantifying soil arching[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(2): 171 - 179.
- [17] 芮 瑞, 黄 成, 夏元友, 等. 砂填料桩承式路堤土拱效应模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2082 - 2089. (RUI Rui, HUANG Cheng, XIA Yuan-you, et al. Model tests on soil arching effects of piled embankments with sand fills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2082 - 2089. (in Chinese))
- [18] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 318.