

文章编号:1001-4888(2018)04-0567-10

基于环圈仪的土压力传感器标定技术分析^{*}

刘钢^{1,2}, 罗强², 张良², 张立祥³

(1. 西华大学土木建筑与环境学院, 四川成都 610039; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川成都 610031;
3. 中国水电顾问集团成都勘察设计研究院交通分院, 四川成都 610072)

摘要:合理地进行土压力传感器标定是提高土压力测试精度的基本保证,环圈仪由于克服了侧壁摩擦的影响,被认为是一种良好的标定设备。运用有限元分析,探讨了环圈仪侧壁与土介质摩擦接触条件、加载板与土介质表面的不均匀接触状态、土压力传感器与土介质的刚度不匹配等因素对环圈仪内土介质应力场分布特征的影响。基于环圈侧壁和加载板等边界条件与土压力传感器本身引起的土介质应力场变化范围互不叠加的原则,提出了环圈仪直径和高度的确定方法。通过试验对环圈仪减小侧壁摩擦的效果进行了验证,利用环圈仪进行标定试验得到的匹配误差与理论计算结果吻合很好,验证了环圈仪标定土压力传感器技术的可靠性。

关键词:土压力传感器;环圈仪;标定技术;有限元计算;侧壁摩擦

中图分类号: TU453

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-074

0 引言

土压力的测试是岩土工程问题研究的基础。传感器埋设在土介质中,由于传感器与土介质的力学性质迥异,势必改变介质原来的应力场,引起应力重分布现象,由此产生的测试压力与真实压力的误差称之为“匹配误差”^[1]。如何掌握匹配误差特性,获得更为接近真实应力的测试值,一直是土压力传感器在岩土工程领域应用研究的一个核心问题。匹配误差的理论计算是重要的途径之一^[2-6],但理论计算要以准确地掌握土压力传感器以及土介质的物理力学参数为前提,这本身也需要细致的试验方能确定。通过标定来确定匹配误差是较为直接、可靠的途径,土介质中的合理标定得到的标定系数可以直接换算得到真实的应力,同时也可以与匹配误差理论之间相互验证。

标定试验中,应在确保试验精度的同时尽可能提高试验的可操作性,标定设备的选取及其关键几何尺寸的确定是实现合理标定的先决条件。常见的标定设备主要包括整体式侧壁的圆筒标定箱和环圈仪^[7],圆筒标定箱的主要缺点是侧壁摩擦对土介质的应力分布影响较大,通常采用较大直径的标定箱来减小侧壁摩擦的影响,直径一般在50~100cm,国内冶金建筑研究院曾利用直径370cm的标定箱进行标定试验;环圈仪由于其结构自身的受力特点从而能很好地减小了侧壁摩擦的影响,瑞典土工所和国内水利水电科学研究院都曾有运用。标定设备的关键几何尺寸主要是指直径和高度,现有文献对此也有探讨,要求土压力传感器离标定箱侧壁要有一定的距离和一定的埋深使土压力传感器在土介质中标定时拱效应现象和应力集中现象与现场使用状态一致^[8],在运用环圈仪对土压力传感器标定时通过依次增加环圈个数来改变上覆土厚度,直至标定结果稳定时认为覆土厚度满足要求^[9]等。在标定试验中,多种几何尺寸的标定设备也都有采用^[10-12]。应该来讲,土压力传感器使用时在土介质中标定的重要性已

^{*} 收稿日期:2017-03-25;修回日期:2017-06-14

基金项目:国家自然科学基金(51408491)、国家973计划课题(2013CB036204)、四川省教育厅重点项目(16206471)资助

通讯作者:罗强(1963—),男,博士,教授。主要研究领域:岩土基本性质及土工结构。Email: LQROCK@swjtu.edu.cn

成为共识,但标定试验设备的选用以及关键几何尺寸的确定随意性较大,没有较为统一原则可供参考,标定试验结果的可靠性无从保证。

环圈仪作为一种性能良好的标定设备,通过深入探讨其结构性能、确定关键几何尺寸、分析其可靠性对推动环圈仪标定技术的应用、实现土压力传感器的合理标定具有重要意义。利用有限元分析软件 ADINA^[13],本文在考虑侧壁摩擦影响下,通过分析环圈仪内土介质应力分布特征,结合室内标定试验,对环圈仪在减小侧壁摩擦、构造土介质近似一维压缩均匀应力状态方面的性能进行验证。在分析环圈仪侧壁与土介质摩擦接触条件、加载板与土介质表面的不均匀接触状态、土压力传感器与土介质的刚度不匹配等因素对环圈仪内土介质应力场分布特征影响的基础上,探讨用于自由场应力测试的土压力传感器标定时环圈仪的直径和高度的确定方法;最后,通过详细的标定试验,得到试验匹配误差与有限元计算结果,与经典解析解进行对比,验证环圈仪标定土压力传感器技术的可靠性。

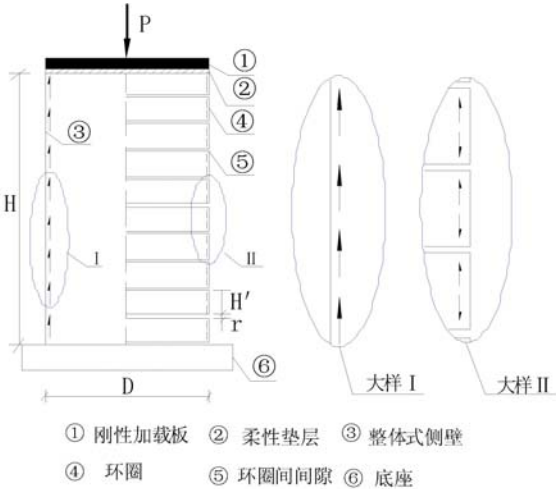


图 1 环圈与整体式侧壁简图
Fig. 1 The structure diagram of the ring-loops and integral side wall

用,下半部分受到向上的摩擦力作用,在中点处出现摩擦力为零的中性点,与环圈侧壁接触的土介质所受的摩擦力如图 1 中大样 II 所示,上半部分受到向上的摩擦力,下半部分受到向下的摩擦力。当土介质在外荷载作用下发生向下的位移时,环圈跟随土介质一起移动,从而在一定程度上也限制了摩擦力的发挥。所以,由于环圈侧壁与土介质特殊的摩擦力作用模式,加之摩擦力发挥程度受到限制,外荷载作用下附加应力沿深度的衰减不明显。

1.2 侧壁摩擦对土介质应力场影响的有限元分析

(1) 计算模型及参数

环圈仪几何形状为圆柱状体,土介质顶面为均匀分布的等强度荷载,故将三维空间模型简化为二维的轴对称模型。土介质视为理想弹塑性体,侧壁视为各向同性的弹性体,计算模拟外荷载作用下土介质中附加应力的变化规律,土介质自重应力不予以考虑。土介质与侧壁的接触条件满足库仑摩擦准则。有限元计算模型参数如表 1 所列。

表 1 计算模型参数
Tab. 1 The parameters of model

	力学参数					几何参数			
	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	土介质与侧壁 摩擦系数 μ	总高度 H/cm	圆筒/环圈直径 D/cm	环圈高度 H'/cm	环圈间隙 r/mm
土介质(砾石土)	60	0.25	40	50	0.2、0.5	52	50	5	2
侧壁	200000	0.16	—	—					

1 环圈仪内土介质应力场分析

1.1 环圈仪结构及侧壁摩擦作用特征

在结构上,将整体式侧壁用一定高度的环圈所替代,环圈与环圈之间留有一定的间隙,便形成环圈仪,如图 1 所示。结构上的这一变化所引起的是侧壁与土介质间相互作用模式的根本改变,整体式侧壁是固定的,土介质在荷载作用下产生向下的位移或向下的位移趋势,侧壁摩擦得以发挥,由于侧壁不能发生位移,所以土介质在与侧壁的接触面受到一致向上的摩擦力作用,如图 1 中大样 I 所示,外荷载作用下介质中附加应力沿深度一致衰减;对于环圈侧壁,由于相邻环圈之间存在间隙,外荷载施加的过程中,环圈要保持初始的平衡状态,摩擦力沿环圈高度的分布为上半部分受到向下的摩擦力作

(2) 计算结果分析

设备侧壁摩擦影响、土压力传感器的埋入均会引起土介质内应力重分布,从而某点的应力状态相对于一维压缩的均匀应力状态将会产生应力偏差,偏差的程度通过式(1)计算:

$$\alpha = \left| 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中, α 为应力偏差度; σ_0 为一维均匀应力场中某点竖向应力,试验时取无侧壁摩擦条件的施加荷载,理论计算取侧壁摩擦系数为 0 时相应点的应力; σ_1 为理论计算取有侧壁摩擦或埋设土压力传感器影响时某点竖向应力,试验时即为传感器输出值。

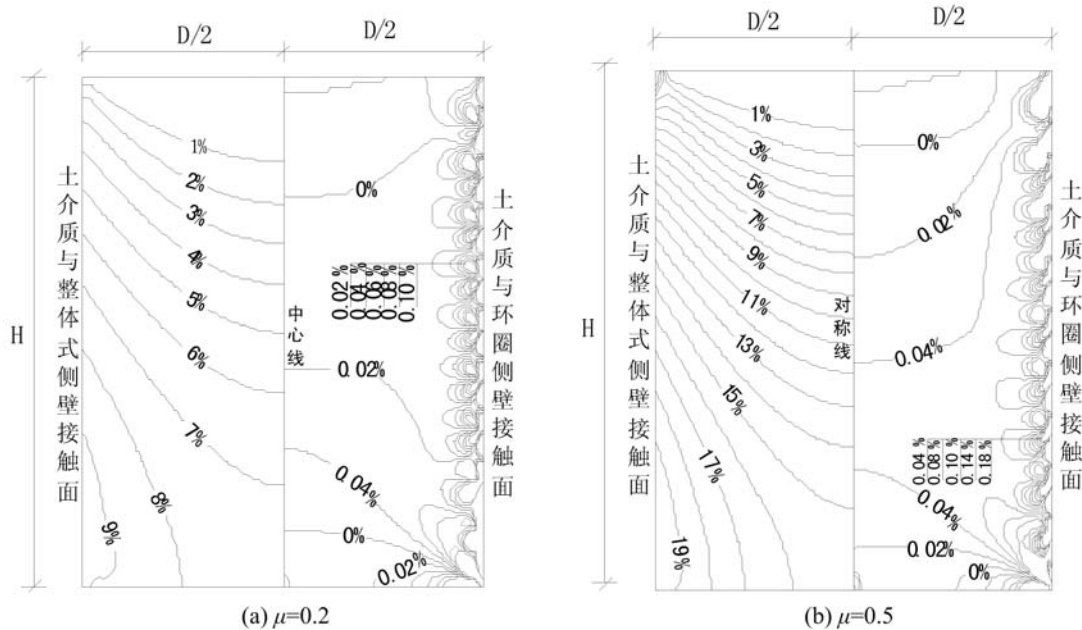


图2 环圈仪与整体式侧壁土介质应力偏差度对比

Fig. 2 The contrast of the soil stress deviation degree between the integral side wall and the ring-loop

图2为整体式侧壁的圆筒和环圈仪内土介质应力偏差度等值线图的对比,当摩擦系数 $\mu=0.2、0.5$ 时,整体式侧壁的圆筒在 $1/2$ 高度处的应力偏差度分别约为 5% 和 11% ,而环圈仪在该高度处的应力偏差度仅为 0.02% 和 0.04% ,二者侧壁与土介质摩擦作用模式的不同引起土介质应力分布呈现出明显区别。侧壁为环圈时,其应力衰减不明显,沿深度呈近似均匀分布,应力分布影响相对较大的区域主要集中在距侧壁约 1 倍环圈高度范围内,即使在这一区域,其应力偏差度相对于整体式侧壁仍然很小,亦可以忽略不计。对于整体式侧壁,竖向应力沿深度衰减,且随着摩擦系数增大,应力衰减程度明显增加;对于侧壁为环圈时,侧壁与土介质的摩擦接触条件对应力分布影响不明显。这一特征表明,对于整体式侧壁的圆筒,若土介质的类型、密实度等发生变化,摩擦接触条件改变而引起的土介质应力分布也会有明显的区别,即应力分布随土介质的不同而发生变化;而对于环圈仪,应力分布受摩擦接触条件影响较小,对不同的土介质均有很好的适应性。无论是侧壁摩擦对应力分布的影响还是对土介质的适应性,环圈仪都优于整体式侧壁的圆筒。

1.3 侧壁摩擦对土介质应力变化影响的试验验证

为了进一步验证环圈侧壁减小摩擦的效果,设计如下试验:按图1所示的环圈仪结构设计加工了一套环圈仪,主要由一系列相同尺寸环圈、刚性底座、“J”型卡扣、手动液压千斤顶和量力环组成,其中环圈直径为 35cm ,高度为 5cm ,”J”型卡扣的厚度为 4mm ,如图3所示。两相邻环圈之间间隙通过“J”型卡扣限位,环圈位置固定,不能产生位移,近似于整体式侧壁,若移出卡扣,侧壁即由环圈组成,形成环圈仪。试验时,将土压力传感器置于中心位置,用于测试荷载作用下传递至该深度时的土压力。通过控制试验用料重量,分层压实,尽量使每次平行试验土介质压实状态较为接近,填筑完成之后,进行三次预压。首先在卡扣不取出时进行整体式侧壁条件下的试验,然后移出卡扣,开展环圈式侧壁条件下的加载

试验。该试验设计可以在不改变土压力传感器周围介质状态的情况下实现两种不同侧壁结构下的试验。



图 3 环圈仪标定试验系统
Fig. 3 The ring-loop apparatus

按上述试验方法,用不同厂家、不同尺寸和不同感应方式的 13 个土压力传感器进行试验。土介质为砾石土,通过筛分试验得到其颗粒组成,最大粒径未超过 40mm, 20~40mm 颗粒含量为 17.8%,大于 2mm 颗粒含量为 73.5%,小于 0.075mm 颗粒含量为 6.8%,不均匀系数为 68,曲率系数为 4.6;通过标准重型击实试验测得其最大干密度为 2.4g/cm³,最佳含水量为 5%;试验中压实系数按 0.9 控制,测得压缩模量为 57MPa。侧壁为环圈状态下,环圈内土介质的应力场近似一维压缩均匀应力状态,土压力传感器的测试值表示为 α ;整体式侧壁时,土压力传感器的测试值表示为 σ ,通过式(1)计算出 α 值,如表 2 所列。

表 2 中, α 的最小值为 10.3%,最大值为 18.5%,平均值为 13.7%,均方差为 2.47。采用同一介质进行标定试验,不同传感器均反映出侧壁摩擦对应力的影响在稳定范围内。另外,参照上述试验条件,当 $D=35\text{cm}$,填土表面 20cm 处,摩擦系数按 0.5 取值时^[14],通过有限元计算得到中心点处的 α 和该高度整个平面处 α 的平均值分别为 14.1%和 15.7%,与试验结果较吻合。试验同样表明,侧壁结构的变化引起边界接触条件的改变对试验结果的影响较为明显。

表 2 不同传感器的 α 值
Tab. 2 The different transducers' α

编号	结构及感应方式	直径/mm	厚度/mm	厚径比	α /%
1	单膜钢弦式	120	26	0.22	13.1
2		110	25	0.23	11.4
3		110	25	0.23	11.8
4		114	28	0.25	14.3
5		114	28	0.25	10.3
6	双膜钢弦式	114	37	0.32	13.0
7		110	32	0.29	12.1
8		110	32	0.29	10.4
9	油腔电阻式	180	24	0.13	16.5
10		180	22	0.12	18.5
11		67	13	0.19	16.8
12		67	13	0.19	14.3
13		180	30	0.17	15.6

2 环圈仪关键几何尺寸的确定方法

环圈仪内土介质的应力分布因土压力传感器与土介质的刚度差异、加载板与土介质的不均匀接触

状态、环圈侧壁与土介质的摩擦接触条件的影响而发生改变,如图 4 所示。显而易见,环圈仪的直径和高度越大,边界与土压力传感器之间相互影响越小,若一律采用大尺寸的环圈仪会增加标定试验的工作量和难度,采用合理的环圈仪直径和高度,方可在保证试验精度前提下提高试验效率。

2.1 土压力传感器与土介质刚度差异引起应力分布的变化

土压力传感器埋设在土介质中引起介质应力重分布的范围受其几何尺寸以及与土的模量比的影响。常用的土压力传感器厚径比(h/d)一般在 0.15~0.25 之间,变化不大,其影响不予以考虑,而传感器与土介质的模量比变化较大,因此计算中选取厚径比为 0.2,探讨不同模量比(E_g/E_s)情况下影响范围与土压力传感器直径的关系,土压力传感器模型简化与文献[15]一致。

计算结果表明,不论在竖向还是水平向,应力重分布的范围与土压力传感器的直径基本呈线性关系,但模量比不同,应力重分布区别较大,模量比越接近于 1,应力重分布范围越小,如图 5、图 6 所示。当 $E_g/E_s=1$ 时,理论上不引起应力重分布,实际计算也表明 $E_g/E_s=1$ 时,土介质各点的应力偏差度均在 1% 以内;当 $E_g/E_s>1$ 时,影响范围随着模量比的增大而增加,模量比从 5 增加至 100, 2% 和 5% 应力偏差度的竖向影响高度(L_v)与土压力里传感器直径(d)的比值分别由 0.96 增加至 1.13、0.57 增加至 0.67,水平向影响宽度(L_s)与土压力里传感器直径(d)的比值分别由 0.30 增加至 0.37、0.18 增加至 0.22;当 $E_g/E_s<1$ 时,影响范围随着模量比的增大而减小,模量比从 0.1 增加至 0.5, 2% 和 5% 应力偏差度的竖向影响高度与土压力里传感器直径(d)的比值分别由 1.71 减小至 1.05、1.22 减小至 0.60;水平向影响宽度与土压力里传感器直径(d)的比值分别 0.63 减小至 0.33、0.38 减小至 0.19。从计算结果可以看出,当土压力传感器与土介质模量比 $E_g/E_s>1$ 时,所引起的应力重分布范围较 $E_g/E_s<1$ 时要小。

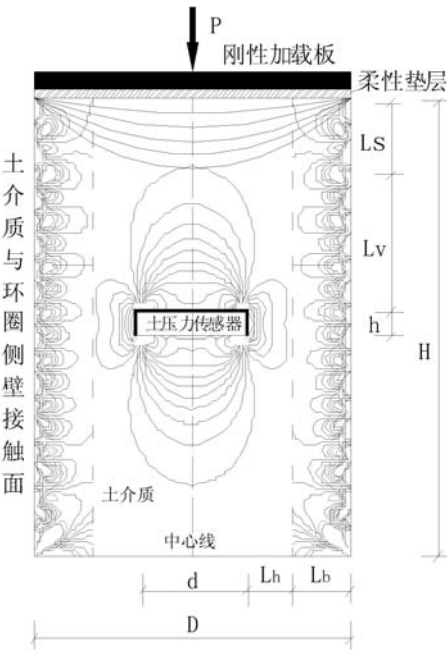


图 4 土压力传感器和边界引起应力变化范围示意图

Fig. 4 The range of stress's change caused by the pressure transducer and the boundary

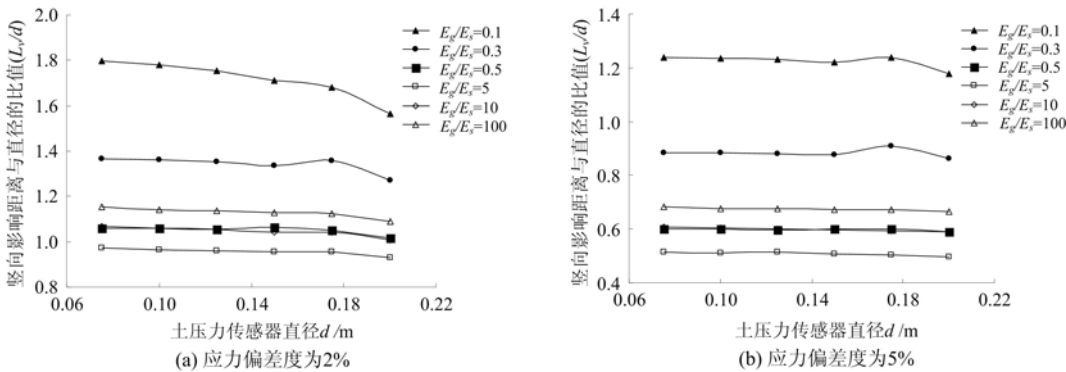


图 5 竖向影响高度与直径的关系

Fig. 5 The relationship between the distance affected by the pressure transducer with it's diameter in vertical

图 7 为竖向与水平向影响距离与土压力传感器的比值随模量比的变化。由图 7 可以看出,当模量比在 1 附近变化,影响距离的波动相对较大;当模量比大于 5 时,影响距离受模量比的影响已不显著。表 3 列出几种典型模量比情况下的 L_v/d 和 L_h/d ,以供参考。

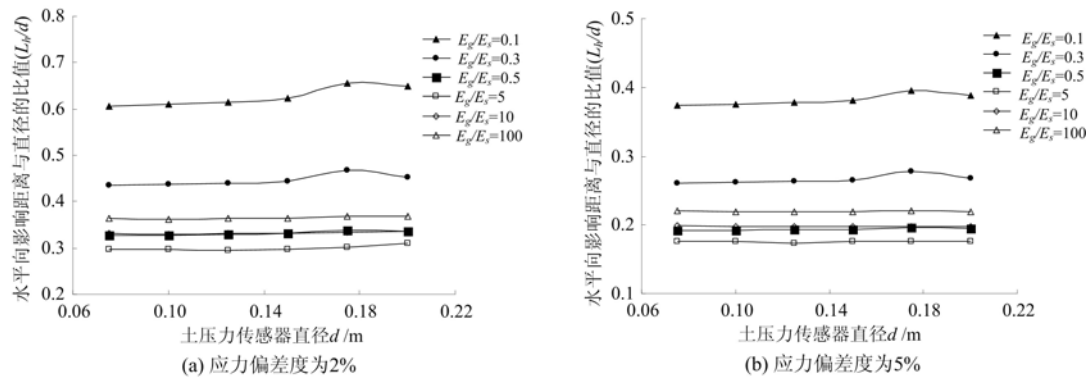


图 6 水平影响宽度与直径的关系

Fig. 6 The relationship between the distance affected by the pressure transducer with it's diameter in horizontal

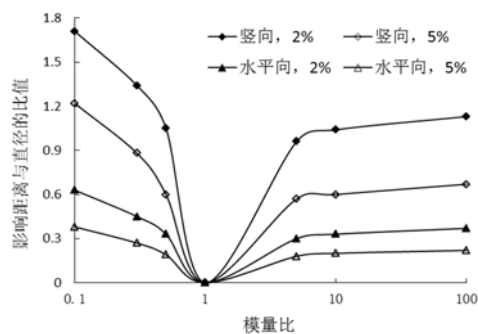


图 7 影响距离与模量比的关系

Fig. 7 The relationship between the distance affected by the pressure transducer with the ratio of modulus

表 3 模量比与应力重分布影响范围

Tab. 3 The range by the pressure transducer at different modulus ratio

模量比	2%		5%	
	竖向 (L_v/d)	水平向 (L_h/d)	竖向 (L_v/d)	水平向 (L_h/d)
0.1	1.71	0.63	1.22	0.38
0.3	1.34	0.45	0.88	0.27
0.5	1.05	0.33	0.60	0.19
5	0.96	0.30	0.57	0.18
10	1.04	0.33	0.60	0.20
100	1.13	0.37	0.67	0.22

通过上述分析可以认为,当土压力传感器与土介质模量比在 0.1~100 之间变化时,由土压力传感器与土介质刚度差异引起的应力分布改变的竖向影响高度满足式(2)、(4)、(6)、(8),水平向影响宽度满足式(3)、(5)、(7)、(9)。

应力偏差度为 2%,当 $E_g/E_s > 1$ 时

$$L_v < 1.2d \quad (2)$$

$$L_h < 0.4d \quad (3)$$

当 $E_g/E_s < 1$ 时

$$L_v < 1.8d \quad (4)$$

$$L_h < 0.7d \quad (5)$$

应力偏差度为 5%,当 $E_g/E_s > 1$ 时

$$L_v < 0.7d \quad (6)$$

$$L_h < 0.3d \quad (7)$$

当 $E_g/E_s < 1$ 时

$$L_v < 1.3d \quad (8)$$

$$L_h < 0.4d \quad (9)$$

2.2 加载板与土介质表面不均匀接触状态引起应力分布的变化

加载板与土介质之间的非良好接触状态大致可分为两种,其一是加载板与土介质的未接触部分较为分散,这种接触状态对荷载的传递影响较小,应力沿深度很快趋于均匀分布,可视为均匀接触;其二是加载板与土介质的未接触部分较为集中,从而与加载板接触部分的土介质应力高度集中,导致应力沿深

度分布不均匀。第二种接触状态是不均匀的,也是最为不利的,进一步将这种不利接触状态简化为土介质表面中间凸、四周凹或中间凹、四周凸,由此会引起加载板中心附近沿深度方向附加应力的集中或衰减。一般情况下,在加载板与土介质表面之间设置一层柔性垫层来调整应力分布,如软橡胶垫、细砂等。从图8可以看出,当加载板与土介质表面完全接触时,是否设置柔性垫层对应力分布没有影响;不完全接触时,柔性垫层的作用得以发挥。不管土介质表面是中间凸或凹,不设置柔性垫层时,影响范围随未接触面积的增加呈单调增加趋势,当未接触面积占加载板面积的50%时,中心点处应力偏差度为2%的深度(L_v)约为0.8倍的环圈直径,应力偏差度为5%时,约为0.6倍环圈直径;设置柔性垫层后,虽未接触面积发生变化,但影响范围基本保持稳定,当未接触面积占加载板面积的50%时,中心点处应力偏差度为2%的深度约为0.05倍(中间凸)和0.25倍环圈直径(中间凹),应力偏差度为5%时,约为0.01倍(中间凸)和0.1倍环圈直径(中间凹)。加载板与土介质的接触状态在每次标定试验中很难稳定控制,所以,设置柔性垫层是很好地规避接触状态影响的有效措施。对于中间凸或凹的接触状态,其影响深度满足式(10)~(13)。

设置柔性垫层:

$$\text{中间凸} \quad L_s < 0.1D \quad (10)$$

$$\text{中间凹} \quad L_s < 0.25D \quad (11)$$

不设置柔性垫层:

$$\text{中间凸} \quad L_s < 0.7D \quad (12)$$

$$\text{中间凹} \quad L_s < 0.8D \quad (13)$$

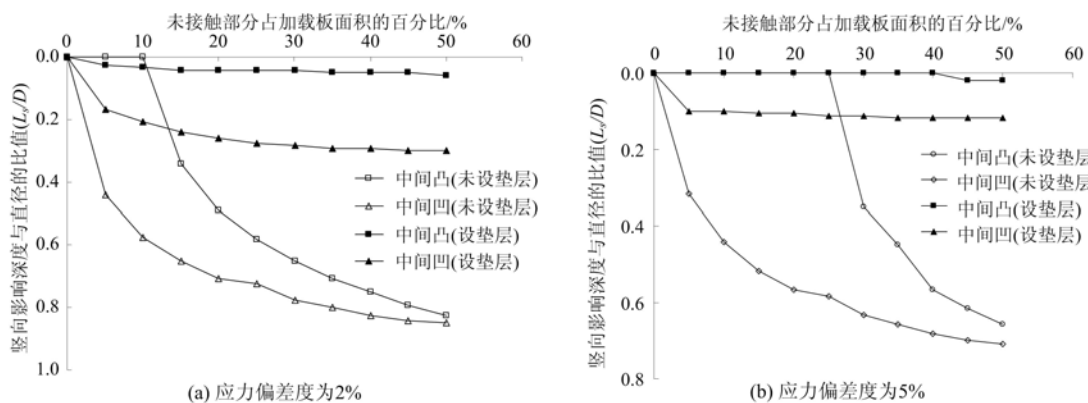


图8 加载板与土介质不同接触条件下对竖向应力分布的影响

Fig. 8 The distribution of stress affected by the contract condition of loading board and soil

2.3 环圈仪直径和高度的确定

标定试验中理想的情况是加载板与土介质表面不均匀接触状态,环圈侧壁与土介质的摩擦接触条件与土压力传感器与土介质刚度差异引起应力分布变化范围互不叠加,构造标定试验中与现场使用环境一致的应力状态。基于这一原则,当 E_g/E_s 在 0.1~100 范围内,环圈仪直径和高度满足式(14)、(15)时,可很好地实现室内标定试验中对土压力传感器现场使用环境的模拟。

$$D \geq d + 2(L_h + L_b) \quad (14)$$

$$H \geq h + 2(L_v + L_s) \quad (15)$$

式中, D 为环圈仪直径; H 为环圈仪高度; d 为土压力传感器直径; h 为土压力传感器厚度。

式(14)、(15)中, L_v 、 L_h 的取值可参考式(2)~(9),或按表3选取;对于 L_b ,理想情况取1倍的环圈高度(一般取0.1~0.2倍环圈直径),也可取1/2环圈高度; L_s 取值参考式(10)~(13)确定。一般情况下,若环圈仪直径和高度分别取2~2.5和3~4倍土压力传感器直径时,可适用于绝大多数(土压力传感器与土介质的模量比在0.1~100范围内)土压力传感器的标定。

3 标定试验与有限元和理论计算结果的对比分析

利用环圈仪对同一批次的某型号 12 个直径为 180mm、厚度为 26mm 的双膜电阻式土压力传感器进行砾石土中的标定试验。土介质类型、压实方法和控制标准与 1.3 节所述一致。环圈直径为 35cm, 高度为 5cm, 共 10 个环圈组成环圈仪。为避免试验中卡扣取出时相邻环圈出现接触情况, 环圈之间采用 5mm 间隙。通过压缩试验测得该状态下砾石土压缩模量约为 57MPa, 泊松比取 0.25 换算得到的变形模量为 47MPa, 通过直接加载试验测得该批次土压力传感器承压膜的变形值, 计算得到土压力传感器的变形模量为 8~12MPa, 平均值为 10MPa, 因此土压力传感器的变形模量(E_g)与砾石的变形模量(E_s)之比取为 0.21。通过式(14)、(15)验证, 环圈仪直径和高度满足试验要求。标定试验得到砾石土表面施加荷载与土压力传感器输出量之间的关系 $p_0 = k_0 \epsilon_0$ 。试验中同时在加载板上安装百分表测得土介质的压缩模量(取泊松比为 0.25 换算为变形模量 E_s)。另外, 利用对土压力传感器直接加载试验获取了传感器顶面所受荷载与输出量的关系 $p = k\epsilon$, 同时测得传感器的变形模量 E_g 。砾石土中土压力传感器的输出量为 ϵ_0 时, 带入 $p = k\epsilon$ 可得到土介质受土压力传感器扰动后的实测压力 p_i 。因此, 每个土压力传感器在砾石土中使用时的匹配误差 $\beta_{\text{试验}}$ 可以由式(16)计算得到。

$$\beta_{\text{试验}} = \frac{p_i - p_0}{p_0} = \frac{k - k_0}{k_0} \quad (16)$$

试验中同时获取了级配碎石和土压力传感器的变形模量, 即 E_s/E_g 已知, 如表 4 所列, 加之土压力传感器的厚径比为已知量, 则由经典的巴兰诺夫解析理论公式^[6](17)可得到匹配误差的解析解 $\beta_{\text{解析}}$ 。

$$\beta_{\text{解析}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \frac{E_s}{E_g}}{\frac{\pi(1 - \mu^2)}{4} \cdot \frac{d}{h} + \frac{E_s}{E_g}} \right] \quad (17)$$

式中, μ 为土介质的泊松比, 计算中取 0.25。

表 4 匹配误差对比

Tab. 4 The matching error contrast

编号	$\beta_{\text{有限元}}$	$\beta_{\text{解析}}$	$\beta_{\text{试验}}$	模量比
1	-0.25	-0.18	-0.21	0.22
2	-0.29	-0.21	-0.27	0.18
3	-0.25	-0.18	-0.25	0.22
4	-0.24	-0.17	-0.30	0.24
5	-0.29	-0.21	-0.18	0.19
6	-0.29	-0.21	-0.34	0.19
7	-0.34	-0.25	-0.32	0.15
8	-0.30	-0.22	-0.37	0.17
9	-0.21	-0.15	-0.25	0.27
10	-0.29	-0.21	-0.30	0.18
11	-0.22	-0.16	-0.36	0.26
12	-0.21	-0.15	-0.34	0.27
平均值	-0.27	-0.19	-0.29	0.21

另外, 利用实测的土压力传感器和土介质的模量等参数通过有限元分析得到了匹配误差的有限元解($\beta_{\text{有限元}}$)。表 4 为三种途径获取的该型号 12 个土压力传感器在级配砾石中的匹配误差 $\beta_{\text{试验}}$ 、 $\beta_{\text{解析}}$ 、 $\beta_{\text{有限元}}$ 分别在 -0.18~-0.37、-0.18~-0.25、-0.21~-0.34 之间波动, 平均值分别为 -0.29、-0.19、-0.27。从平均值看, 匹配误差的试验结果、解析解和有限元计算值三者较为吻合。由于经典

的解析解计算模型假定土压力传感器放置于半无限体介质中,不受边界的影响;有限元计算中土介质模型的直径为土压力传感器的5倍,边界条件的影响基本可忽略不计。说明采用合理的环圈仪直径和高度能很好地消除标定设备边界的影响,进一步验证了环圈仪标定土压力传感器技术具有较高可靠性。

4 结论

通过对环圈仪标定土压力传感器的结构性能、关键几何尺寸以及运用的可靠性等问题的分析,有如下结论:

(1) 环圈仪因改变了整体式侧壁与土介质之间摩擦作用模式,减小了边界接触条件对圈内土介质应力分布的影响,其应力在竖向呈一维压缩的均匀应力状态。同时,其减小边界接触条件影响的效果通过试验得到了验证。

(2) 得到了由土压力传感器与土介质刚度差异、加载板与土介质表面不均匀接触状态和环圈仪侧壁与土介质摩擦接触条件对应力分布的影响规律,基于侧壁和加载板等边界条件与土压力传感器本身引起的土介质应力场变化范围互不叠加的原则,提出了环圈仪直径和高度的确定方法。一般情况下,若环圈仪直径和高度分别取2~2.5和3~4倍土压力传感器直径时,可实现土压力传感器的合理、有效标定。

(3) 利用环圈仪进行标定试验,得到的试验匹配误差与有限元计算结果和经典的解析解很好地吻合,进一步说明了环圈仪可有效降低侧壁接触条件的影响,用于土压力传感器的标定具有较好的可靠性。

参考文献:

- [1] 曾辉,余尚江,陈佳妍. 岩土压力传感器静匹配问题的研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(7):1173—1176 (ZHENG Hui, YU Shangjiang, CHENG Jiayan. Development of research on pressure transducer static matching error in rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7):1173—1176 (in Chinese))
- [2] 曾辉,余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, 22(1):99—105 (ZHENG Hui, YU Shangjiang. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1):99—105 (in Chinese))
- [3] 曾辉,余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12):2003—2006 (ZHENG Hui, YU Shangjiang. Characteristics of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12):2003—2006 (in Chinese))
- [4] 余尚江,曾辉. 土中自由应力场与结构表面压力测量的差异[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6):684—687 (YU Shangjiang, ZHENG Hui. The difference between measurements of stress in soil and pressure on wall-surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6):684—687 (in Chinese))
- [5] 俞儒一,安春春. 土压力传感器的动力匹配问题初探[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(6):38—47 (YU Ruyi, AN Chunchun. Preliminary study on dynamic matching for soil pressure transducers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(6):38—47 (in Chinese))
- [6] 汪恩清,丁世敬. 土压力传感器动匹配误差理论研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3):79—83 (WANG Enqing, DING Shijing. The investigation for dynamic matching error in the registration of soil pressure cells[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3):79—83 (in Chinese))
- [7] 刘宝有. 钢弦式传感器及其应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 1986 (LIU Baoyou. Vibrating wire pressure sensors and application[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1986 (in Chinese))
- [8] 刘宝有. 土压力传感器的标定方法[J]. 传感器技术, 1990(3):42—45 (LIU Baoyou. Calibration method of soil-pressure sensors[J]. Transducer Technology, 1990(3):42—45 (in Chinese))
- [9] 刘宝有. 电阻应变式土压力传感器土中标定的试验研究[J]. 传感器技术, 1987(4):7—13 (LIU Baoyou. Study on the calibration test in soil of resistance strain soil-pressure sensors[J]. Transducer Technology, 1987(4):7—13 (in Chinese))
- [10] 李春林,陈青春,丁启朔. 用于土壤压实监测的土压力传感器标定[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(4):63—66

- (LI Chunlin, CHEN Qingchun, DING Qishuo. Calibration of soil pressure sensors for compaction monitoring[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(4):63—66 (in Chinese))
- [11] 韦四江, 王大顺, 郜进海, 等. 微型土压力盒的标定及修正[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5):1003—1006 (WEI Sijiang, WANG Dashun, GAO Jinhai, et al. Calibration and correction of miniature earth pressure cell[J]. Chinese Journal of Underground and Space and Engineering, 2009, 5(5):1003—1006 (in Chinese))
- [12] 陈春红, 刘素锦, 王钊. 土压力盒的标定[J]. 中国农村水利水电, 2007(2):29—32 (CHEN Chunhong, LIU Sujing, WANG Zhao. Calibration of earth pressure cell[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(2):29—32 (in Chinese))
- [13] Bathe K J. ADINA theory and modeling guide[M]. ADINA R&D, Inc., 2010.
- [14] 程展林, 左永振, 姜景山, 等. 粗粒料试验中界面摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3):331—334 (CHENG Zhanlin, ZUO Yongzhen, JIANG Jingshan, et al. Experimental research on interface friction in granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3):331—334 (in Chinese))
- [15] 张立祥, 罗强, 刘钢, 等. 基于正交试验的匹配误差影响因素分析[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3):50—53 (ZHANG Lixiang, LUO Qiang, LIU Gang, et al. Analysis of matching error of soil pressure transducer based on orthogonal design [J]. Transducer and Microsystem Technologies. 2011, 30(3):50—53, 56

Analysis of earth pressure transducer calibration technique based on ring-loop instrument

LIU Gang^{1,2}, LUO Qiang², ZHANG Liang², ZHANG Li-xiang³

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Transportation Branch of HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: Reasonable calibration of earth pressure transducer is the basic guarantee to improve the precision of earth pressure measurement. Ring-loop instrument is considered as good calibration equipment due to it overcomes the effect of lateral wall friction. By using finite element analysis, the influence of the friction contact condition between lateral wall and earth medium, the influence of the non-uniform contact state between loading plate and earth medium surface, and the influence of the stiffness mismatch between earth pressure transducer and earth medium on the distribution characteristics of earth medium stress field in ring-loop instrument were discussed. Based on the principle that the variation range of earth medium stress field caused by boundary condition between ring-loop lateral wall and loading plate are not superposed with the variation range of earth medium stress field caused by earth pressure transducer itself, a method for determining the diameter and height of ring-loop gauge was proposed. The effect of ring-loop instrument to reduce the lateral wall friction is verified through experiment. The matching error obtained from the calibration experiment with the ring-loop instrument is in good agreement with the theoretically calculated result, which verifies the reliability of the earth pressure transducer calibrated by ring-loop instrument.

Keywords: earth pressure transducer; ring-loop instrument; calibration technique; finite element calculation; lateral wall friction