

文章编号: 1005-0523(2023)04-0093-10



水囊土压力计研制与试验验证研究

黄大维^{1,2}, 彩国庆^{1,2}, 徐长节^{1,2}, 罗文俊^{1,2}, 胡光静³, 詹涛⁴

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511457; 4. 南昌轨道交通集团有限公司地铁项目管理分公司, 江西 南昌 330038)

摘要:针对土压力盒易发生应力集中的问题, 研制了水囊土压力计, 即通过透明的 PU 空压软管将感压水囊与电子压力表进行连接, 其中感压水囊的厚度可控制在 5~10 mm, 在使用时电子压力表的高度位置进行固定。将水囊土压力计与振弦式土压力盒埋设不同压缩模量的土体中进行了对比试验, 结果分析表明, 由于感压水囊比土压力盒薄, 虽然实测土压力偏大问题不可避免, 但相对土压力盒测试结果而言, 采用水囊土压力计测试地层中的土压力时应力集中问题显著改善; 从测试结果可知, 由测试元件厚度所导致的土压力偏大幅值为非线性, 这与测试元件周围的土体颗粒变形调整有关。将水囊土压力计用于盾构隧道响应模型试验研究中, 从测试结果可知, 水囊土压力计与土压力盒的测试结果具有明显的不同; 从测试结果的变化趋势分析来看, 水囊土压力计的测试结果可信, 且有必要采用水囊土压力计直接贴在模型盾构隧道外壁测试其周围土压力。水囊土压力计的测试原理简单, 且成本低、精度高, 因其为柔性构造, 可根据测试需求选用感压水囊用于结构物表面为非平面的土压力测试。

关键词: 土压力; 土压力传感器; 水囊土压力计; 被动土拱效应; 模型试验

中图分类号: [U25]; TU415

文献标志码: A

本文引用格式: 黄大维, 彩国庆, 徐长节, 等. 水囊土压力计研制与试验验证研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 93-102.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.012

Development and Experimental Validation of Water Bladder Earth Pressure Gauge

Huang Dawei^{1,2}, Cai Guoqing^{1,2}, Xu Changjie^{1,2}, Luo Wenjun^{1,2}, Hu Guangjing³, Zhan Tao⁴

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-Mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 511457, China; 4. Metro Project Management Branch of Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: Based on the problem of earth pressure concentration in earth pressure cells, a water bladder earth pressure gauge was invented. The thickness of pressure sensing water bladder can be controlled within 5~10 mm. The pressure sensing water bladder is connected with the electronic pressure gauge through the transparent PU air pressure hose. The height position of the electronic pressure gauge needs to be fixed when the water bladder earth pressure gauge is used. A comparison test was conducted between the water bladder earth pressure gauge and the vibrating string earth pressure cell buried in soils with different compression modulus. The analysis of the results shows that, although the problem of high measured earth pressure is unavoidable, the stress concentration problem is significantly improved when the earth pressure in the stratum is tested with the water bladder

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078213, 52238009, U1934208, 52225210); 江西省杰出青年基金项目(20192ACBL21003); 江西省技术创新引导类计划项目(20203AEI008)

earth pressure gauge compared with the earth pressure cell as the pressure sensing water bladder being thinner than the earth pressure cell. From the test results, it can be seen that the amplitude of soil pressure caused by the thickness of the test element is non-linear, which is related to the adjustment of soil particle deformation around the test element. The water bladder earth pressure gauge is used in the model test of shield tunnel response. The test results show that the water bladder earth pressure gauge is obviously different from the earth pressure cell. From the analysis of the changing trend of the test results, the test results of the water bladder earth pressure gauge are reliable and it is necessary to use a water bladder earth pressure gauge directly attached to the outer wall of the model shield tunnel to test its surrounding soil pressure. The test principle of the water bladder earth pressure gauge is simple with low cost, and the precision is high. Because of its flexible construction, the pressure sensing water bladder can be used to test the earth pressure of non-plane structure surface according to the test demand.

Key words: earth pressure; earth pressure sensor; water bladder earth pressure gauge; passive soil arching effect; model test

Citation format: HUANG D W, CAI G Q, XU C J, et al. Development and experimental validation of water bladder earth pressure gauge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 93-102.

土压力是岩土工程与地下工程研究中涉及的重要力学指标,因此,土压力测试也成为上述领域研究经常涉及的测试内容。现有的土压力测试普遍采用土压力盒,其测试精度一直是学者们所关注的重要内容,张海丰等指出由于土压力盒的刚度远大于周围土体,在土压力盒周围易形成被动土拱效应而导致测试结果大于实际土压力^[1-4]。王继成等^[5], Talesnick 等^[6]分析认为,土压力盒的测试结果与实际土压力的偏差与土体的超、欠固结状态有关,即与土体的压缩模量变化有关。简笋等^[7],任连伟等^[8], Talesnick^[9]指出,由于土压力盒的刚性特性,气标法与砂标法所得到的系数完全不同。分析可知,土压力盒由于存在一定的厚度,且刚度大,在测试土压力过程中易发生应力集中,由此导致测试结果偏大。

针对现有的土压力盒测试时存在的问题,国内外学者研发了新型的薄膜式土压力传感器。刘开源等^[10]研究的 FSR (film pressure sensor) 是一种薄膜式土压力传感器,将含有导电物质的高分子材料夹在两层聚合物膜片中间,当膜片受法向作用时,高分子材料的变形使膜片中间产生导电通道而降低 FSR 电阻,通过电阻-电压的关系测量土压力值。廖波等^[11]利用具有压敏性的填充型导电聚合物复合材料研发了一种新型薄膜式土压力分布传感器,并通过大型模型试验测试检验了其可行性。而薄膜式土

压力传感器虽然厚度很小且具有柔性,但是抗电磁干扰能力较差,元件易损,成本高,因此在日常中应用少。

本文则提出了一种用于测试土压力的水囊土压力计,并通过配制不同压缩模量的土体进行了测试结果对比试验。本研究将此水囊土压力计应用于盾构隧道相关研究的室内模型试验中,并对测试结果进行了分析。

1 水囊土压力计研制

1.1 水囊土压力计构成

水囊土压力计由 3 部分组成,分别为感压水囊,电子压力表以及感压水囊与电子压力表之间连接的透明空压软管。各部分的选择要求如下。

1) 电子压力表:其量程在满足使用要求的情况下尽量小,以确保其灵敏度,并减小误差(因为误差与量程有关)。在使用前,通过在透明空压软管内注水,利用液位与压力表之间的高差来核实压力表的精准度。从测试结果看,电子压力表的读数精度完全可满足试验要求。

2) 感压水囊:可为方形或圆形,根据试验的规模确定其尺寸。从市场调研来看,市面上用于门窗安装定位用的气垫气囊可直接用作感压水囊,为矩形扁平结构,长、宽分别为 160 mm、150 mm。

3) 透明空压软管:感压水囊与电子压力表之间

通过透明的 PU 空压软管进行连接,其软硬度适中,在埋入地层中不会被压扁而影响管内水压传递。选择内径为 5 mm、外径为 8 mm 的透明 PU 空压软管,其长度根据测点与电子压力表位置的距离确定。

1.2 水囊土压力计使用

水囊土压力计在使用时,对电子压力表的精准度进行核实(通过透明软管内的液位与压力表之间的高差读取压力表压力进行标定即可)。根据需要剪取满足长度要求的透明空压软管,其一端与感压水囊连接,在连接处采用卡箍加强。通过水囊两侧对压将其内部空气排出,从透明空压软管一端往水囊内注水,注到水囊最大容量时停止注水;再将水囊与透明空压软管的连接口朝上,通过水囊两侧对压将水囊及透明空压软管内的空气排出;当水囊压到厚度约为 10 mm 时透明软管还存在空气,则继续对压水囊两侧,待压到最大限度时再次往水囊内注水。通过反复多次上述操作直到水囊压到厚度约为 10 mm 时透明软管无空气,再与电子压力表连接。将空压管内的空气排出,防止试验时管内空气压缩而导致感压水囊变形过大,进而影响感压水囊周围的应力场。在使用时根据水囊的大小可压到厚度 5~10 mm,防止水囊两侧发生接触,同时也减小感压水囊对周围应力场的影响。

为了避免水囊与压力表之间的高差变化而影响压力表读数,在使用时需要将压力表的高度位置进行固定。在感压水囊完成布设时,将压力表读数进行归零设置。

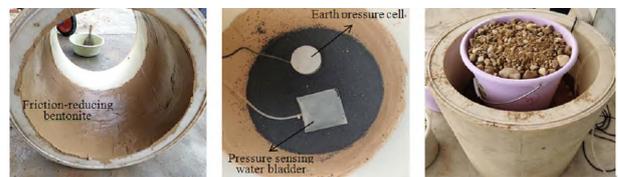
2 水囊土压力计与土压力盒对比试验

2.1 试验方案简介

为了解水囊土压力计在测试地层中土压力的性能,通过室内试验,对水囊土压力计与振弦式土压力盒的测试结果进行了对比分析。其中感压水囊长、宽分别为 160,150 mm,注水后其中心最大厚度约为 10 mm;压力表量程为 300 kPa,最小读数为 0.1 kPa。振弦式土压力盒的直径为 114 mm,厚度为 30 mm。

通过在尼龙管内填充不同压缩模量的土体,并测试土层中的内部土压力,其中尼龙管的壁厚为 7 cm,内径为 51 cm,高度为 75 cm。为了减小填土与尼龙管内壁之间的摩擦,从而减小土体中的压力,填土前在尼龙管内壁粉刷一层厚度约为 5~8 mm 的

膨润土(如图 1(a)所示,在能附着在内壁时尽量增大含水量,以起到良好的润滑效果)。试验时先在圆管内填入 20 cm 厚的土体,再布设土压力测试元件(感压水囊与振弦式土压力盒,如图 1(b)所示),两种土压力测试元件的位置尽量对称,同时保持一定的距离,以尽量减小互相影响。接着继续填土,待填土至 40 cm 时(即在测试元件上下各约 20 cm 的填土),在土体表面放置直径为 49 cm、厚度为 3 cm 的木板(其直径稍小于尼龙管内径,防止木板与尼龙管内壁接触,同时也方便数据线与水管从四周空隙通过),并在木板上方进行分步加载。



(a) Painting bentonite on the inner wall of the cylinder (b) Burial of earth pressure sensors (c) Top loading

图 1 土压力测试试验

Fig. 1 Earth pressure experiment

2.2 土体试样简介

为了分析填土压缩模量对两种土压力测试元件的测试结果影响,试验时采用砂子、砂子与橡胶粒混合材料(体积比为 1:4 进行混合)、纯橡胶粒作为土体试样,土样编号分别为 No.1、No.2、No.3,3 种土体试样的组成及密度、压缩模量如表 1 所示,各土样配制后如图 2 所示。

表 1 土样压缩性能

Tab.1 Compression modulus of soil samples

Item	No. 1	No. 2	No. 3
Soil sample classification	Sand	Soil mixed with sand and rubber	Rubber
Density/(g/cm ³)	1.80	1.35	1.10
Compression factor	0.261	0.995	1.612
Compression modulus/MPa	9.662	2.146	1.333



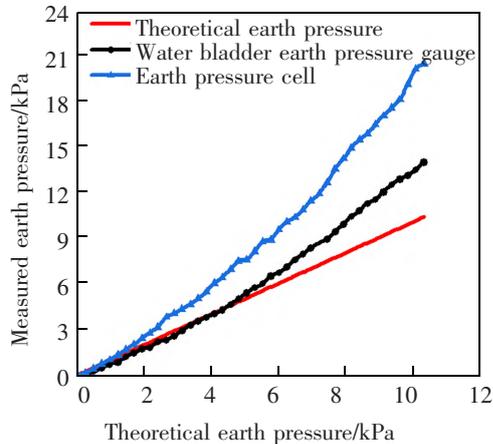
(a) No. 1 (b) No. 2 (c) No. 3

图 2 试验土样

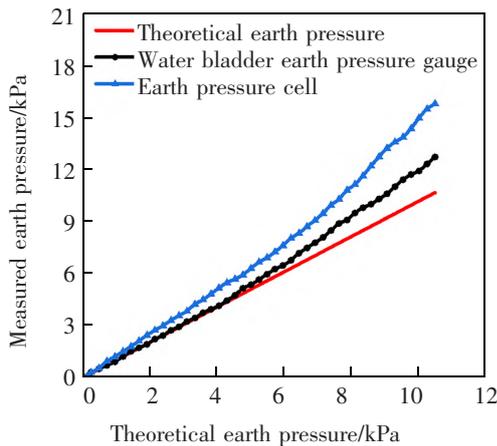
Fig.2 Soil samples

2.3 测试结果对比分析

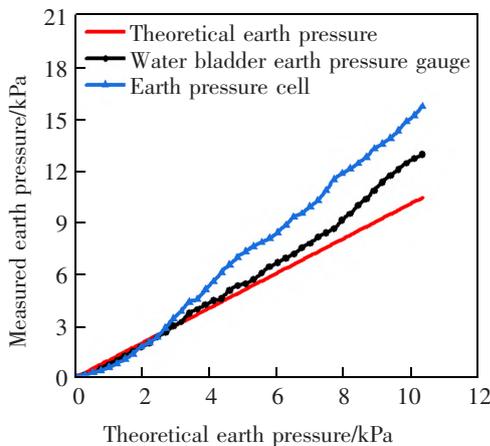
图3为不同土样填入尼龙管容器时,在上部逐步加载过程中水囊土压力计与土压力盒的实测土压力变化结果。从图3可以看出,在加载初期,水囊



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

图3 土压力测试结果对比

Fig.3 Comparison of earth pressure test results

土压力计与土压力盒的测试结果均与理论计算的土压力接近;随着上部加载量增加,两种土压力测试元件均有不同程度的土压力偏大现象,但因感压水囊厚度小,且为四周薄中间厚的柔性结构,其土压力偏大值要明显小于土压力盒,且在理论土压力值较大后才产生明显偏大现象。

从图3(a)与图3(b)、图3(c)对比来看,土体的压缩模量对土压力测试结果影响较大。在逐步加载过程中,测试元件实测土压力偏大值并非为线性增长,主要与土体在不同加载阶段的不同压缩性有关,同时与测试元件周围的土体颗粒移动变化调整有关,如图3(c),实测土压力波动明显,主要在与橡胶粒较为松散,在应力集中发展到一定程度时,测试元件周围的橡胶粒会发生一定的调整变化(类似于在复合地基的桩顶填碎石,在桩顶应力较大时,桩顶的碎石向桩间土上发生流动,从而调整桩顶与桩间土的压力),导致实测土压力有一定的波动。

综上所述试验结果分析可知,本文提出的水囊土压力计用于测试地层中的土压力是可行的,由于存在一定的厚度,实测土压力偏大问题仍然不可避免,但相对于土压力盒而言,其偏大幅度明显要小;本文提出的水囊土压力计的感压水囊为四周薄中间厚的柔性结构,可直接密贴于非平面结构上测试其压力;水囊土压力计采用将感压水囊埋置到地层中,而将电子压力表放置在外面,当用于现场土压力测试时,在结束测试后可方便地将电子压力表取走继续使用(感压水囊成本很低,现场测试无法取出时对测试成本影响可以忽略不计),相比土压力盒而言在节省成本方面优势显著。

3 水囊土压力计应用案例

3.1 盾构隧道响应模型试验简介

针对近年来我国兴起的联络通道机械法施工技术,为了解盾构机施工联络通道时其开挖面稳定控制对接收端已建盾构隧道的影响,考虑开挖面加卸载(相当于开挖面过压与欠压)状态下接收端已建盾构隧道周围土压力变化^[12-15]。试验所用模型盾构隧道管片环采用均质圆环,用厚度为4.6 mm的钢板加工而成,其外径为575 mm,内径为570.4 mm,幅宽为120 mm(如图4(a)所示)。管片内侧每隔90°焊接一个角码,再采用长度为9 cm、直

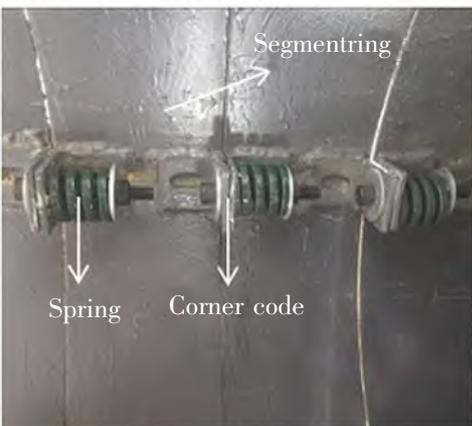
径为 1 cm 的螺栓将两相邻管片环之间角码进行连接。为使环缝连接螺栓具有一定的拉伸弹性,在螺栓内垫入直径与长度均为 4 cm 弹簧,其压缩刚度为 575 N/mm,管片环之间的连接如图 4(b)、图 4(c)所示。



(a) Model tube sheet ring



(b) Ring seam connection method



(c) Inside the model tunnel

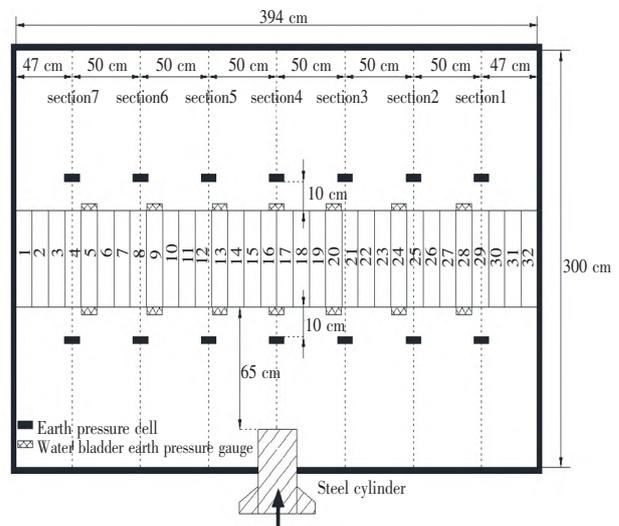
图 4 模型盾构隧道管片环连接

Fig.4 Connection of model shield tunnel segment rings

试验土箱内部长、宽、高分别为 400,300,300 cm (如图 5(a)所示)。在模型隧道底部填 35 cm 砂土,再安装模型隧道,模型盾构隧道沿土箱长度方向埋设,共 32 环(端部与土箱内部之间的空隙采用泡沫剂进行填充,防止砂土掉入隧道内);然后再填厚度约为 60 cm 的黑色橡胶粒(其压缩模量较砂土小,用于模拟隧道位于软土地层);最后在模型隧道上部填 135 cm 砂土。其中砂土的密度约为 1.8 g/cm³,压缩模量为 9.66 MPa;橡胶粒的密度约为 1.1 g/cm³,压缩模量为 1.33 MPa。

为了测试已建盾构隧道周围土压力变化,在模型隧道周围布设了土压力测试元件,包括上述介绍的水囊土压力计及振弦式土压力盒。因土压力盒为刚性结构,直接密贴模型隧道布设将极易导致土压力盒破损,为此将土压力盒布设在与模型隧道净距为 10 cm 的位置;而感压水囊则直接密贴模型隧道布设,土压力测试元件布设位置如图 5 所示。在距离模型隧道 65 cm 位置安装直径为 30 cm 的钢筒,模型试验时通过安装在反力架(与土箱连接)上的千斤顶顶推或缩回实现加卸载,如图 6 所示。

为了对比水囊土压力计与振弦式土压力盒的测试结果,将模型试验全过程中的土压力进行测试,并选取了图 5 中断面 4 位置隧道周围的土压力测试结果(模型试验涉及的测试数据多,基于本论文的主要研究为对比两种土压力测试元件的性能,在此不再分析其他测试结果)。试验过程的各工况如表 2 所示。



(a) Layout of test elements in the soil box

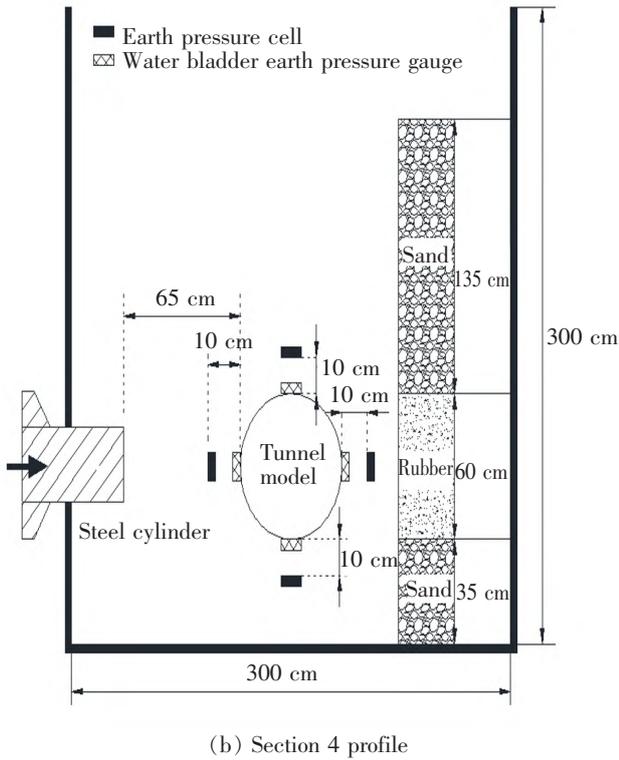


图 5 盾构隧道响应模型试验中土压力测试元件布设示意图
Fig.5 Diagram for earth pressure measurement gauge installation in shield tunnel response model test



(a) Completed installation of steel cylinder thrusting device



(b) Location relationship between the constructed tunnel and the steel cylinder

图 6 模型盾构隧道与钢筒及其顶推装置

Fig.6 Shield tunnel model and steel pipe and its pushing device

表 2 模型试验工况

Tab.2 Conditions of the model test

Test phase	No.	Condition	Test phase	No.	Condition
Fill	1	Complete model tunnel installation	Thrust	16	Steel cylinder thrust 6 cm
	2	Fill to top of tunnel		17	Steel cylinder thrust 8 cm
	3	Fill the top of the tunnel with 20 cm of soil		18	Steel cylinder thrust 10 cm
	4	Fill 40 cm of soil		19	Steel cylinder thrust 12 cm
	5	Fill 60 cm of soil		20	Steel cylinder thrust 14 cm
	6	Fill 80 cm of soil		21	Steel cylinder thrust 16 cm
	7	Fill 100 cm of soil		22	Steel cylinder thrust 18 cm
	8	Fill 140 cm of soil		23	Steel cylinder thrust 20 cm
Rest	9	Rest for 24 hours (1 d)	24	Steel cylinder thrust 22 cm	
	10	Rest for 48 hours (2 d)	25	Steel cylinder thrust 24 cm	
	11	Rest for 72 hours (3 d)	Retract	26	Steel cylinder retract 6 cm
	12	Rest for 96 hours (4 d)		27	Steel cylinder retract 10 cm
	13	Rest for 120 hours (5 d)		28	Steel cylinder retract 13 cm
Thrust	14	Steel cylinder thrust 2 cm		29	Steel cylinder retract 16 cm
	15	Steel cylinder thrust 4 cm		30	Steel cylinder retract 19 cm

3.2 土压力测试结果分析

图 7 为模型试验中表 2 所示各工况下图 5 中断面 4 位置的隧道周围土压力测试结果。从图 7 可以看出水囊土压力计与土压力盒的变形趋势总体是一致的,但由于两者的布设位置不同,加上在钢筒顶推与缩回时,因盾构隧道发生纵向挠曲变形及隧道断面发生竖椭圆变形,导致隧道与地层土体形成相互作用附加荷载,由此导致隧道周围的土压力发生变化。

由图 7 可以看出,在填土阶段(工况 1~工况 8),水囊土压力计的测试结果均稍小于土压力盒的测试结果,其主要原因在于两种测试元件的性能不同,导致其结果不同;此外,在填土过程由于模型隧道的存在,土压力盒与水囊土压力计的应力场也稍有不同。

在钢筒顶推阶段(工况 14~工况 25),土压力自钢筒端部开始向外扩散,从图 7(a)可看出,离钢筒端部越近的土压力盒测试结果增长幅度大于水囊土压力测试结果增长幅度,钢筒顶推力导致隧道发

生水平位移,如图 8 所示(图 8 为断面 4 的水平位移,向钢筒侧发生变形为正,远离钢筒侧发生变形为负)。在钢筒顶推力作用下模型隧道向另一侧发生挠曲变形,从图 8(b)可看出,其水平位移约为 3 mm,由此导致隧道对侧部土体形成挤压,从而形成挤压相互作用力,且该作用力向水平方向逐渐扩散,因此对于图 7(b),在钢筒顶推阶段,水囊土压力计的测试结果增长幅度明显要大于土压力盒的测试结果增长幅度。

在钢筒顶推力作用下,模型隧道在水平方向上发生挠曲位移(如图 8 所示)的同时,也将发生竖椭圆变形时,如图 9 所示(断面 4 位置的水平位移与横断面变形分解情况如图 10 所示),隧道的竖直径增大(图 9(b)工况 14~工况 25 中竖向直径变形增大约 5 mm),由此隧道与其上、下土体形成相对挤压而形成挤压力。该挤压力在向土层中传递时发生扩散,因此图 7(c)与图 7(d)在钢筒顶推阶段的土压力测试结果均增大,因水囊土压力计离隧道近,其土压力测试结果的增长幅度也更大。

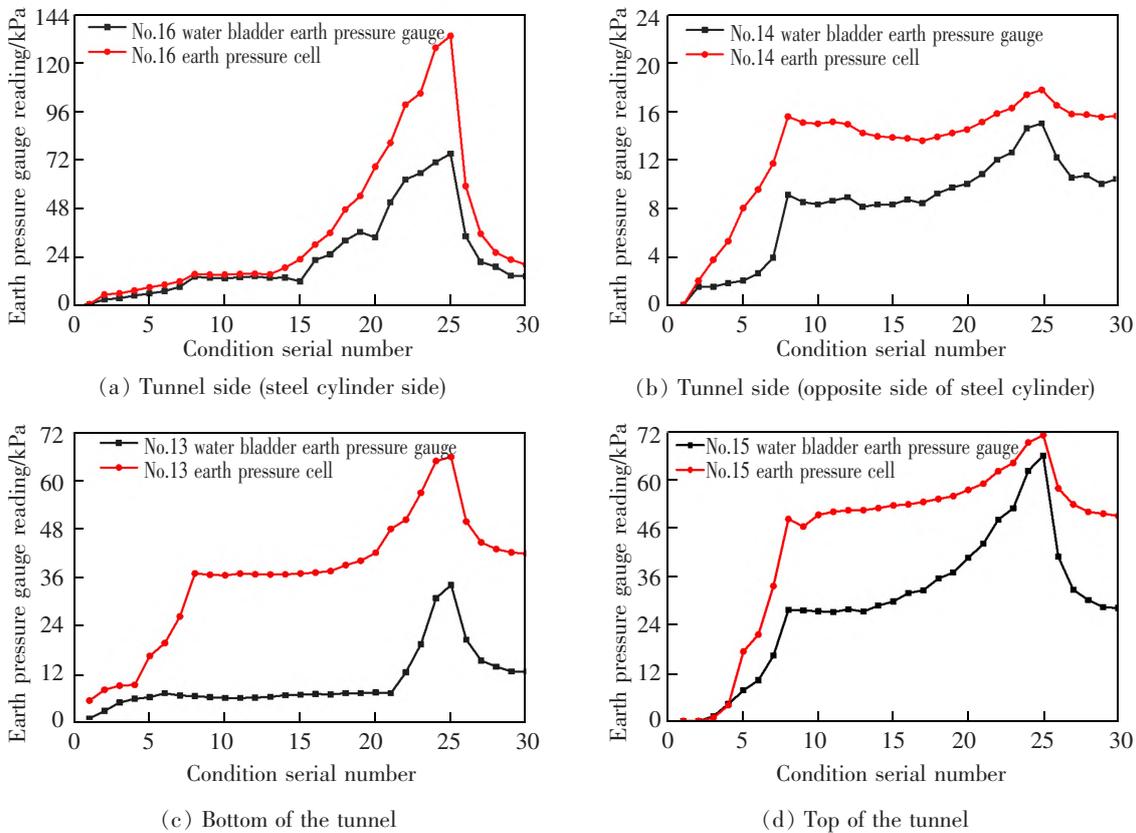
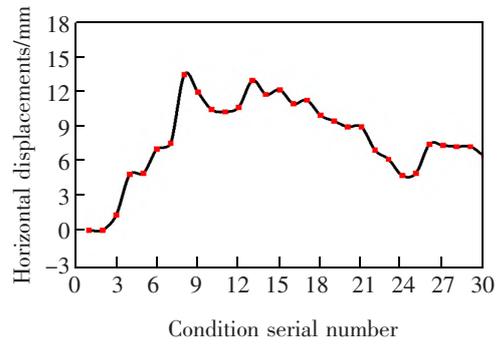
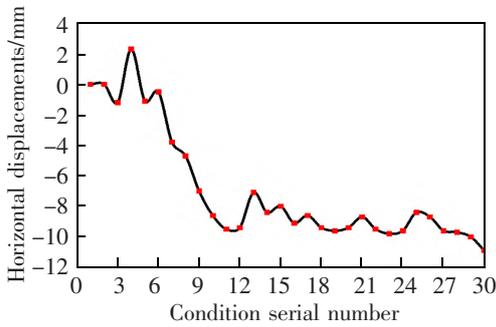


图 7 断面 4 位置隧道周围土压力测试结果
Fig.7 Test result of earth pressure at Section 4 around shield tunnel

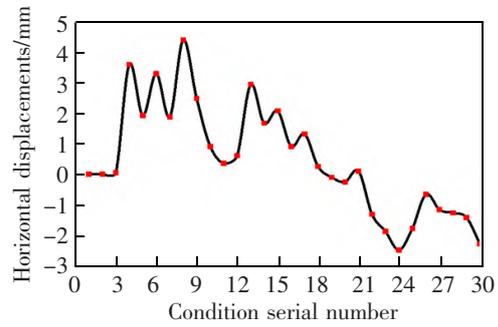
在钢筒缩回阶段(工况 26~工况 30),水囊土压力计与土压力盒的测试结果变化速率与钢筒顶推阶段的测试结果变化速率刚好相反,即钢筒顶推阶段土压力盒测试结果增长幅度大于水囊土压力计测试结果增长幅度,在钢筒缩回阶段土压力盒测试结果减小幅度也大于水囊土压力计测试结果减小幅度,如图 7(a)所示;反之亦然,如图 7(d)所示。此现象也再次证明上述两种测试元件的测试结果变化幅度不同的分析是合理的。



(a) Horizontal displacement of the side of the tunnel near the jacking device

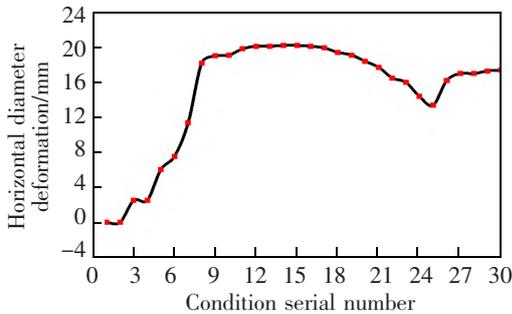


(b) Horizontal displacement of the side of the tunnel away from the jacking device

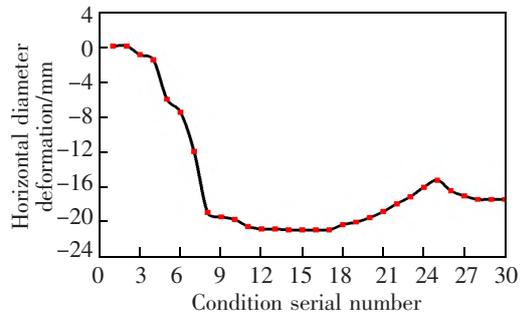


(c) Horizontal displacement of tunnel center

图 8 断面 4 的水平位移
Fig.8 Horizontal displacements at Section 4



(a) Horizontal diameter deformation of cross-section



(b) Vertical diameter deformation of cross-section

图 9 断面 4 的直径变形
Fig.9 Diameter deformations at Section 4

综上分析可知,在盾构隧道受到外部附加荷载作用下,隧道将发生纵向挠曲变形,同时发生横断面变形(断面 4 位置的水平位移与横断面变形分析如图 10 所示)。由于土压力盒为刚性测试元件,模型盾构隧道外壁为弧面,因此土压力盒无法直接密贴在模型盾构隧道外壁上测试其土压力。而采用自主研发的水囊土压力计,

直接贴在模型隧道外壁上,测试到了外壁为弧面的模型盾构隧道土压力。从测试结果可知,土压力盒与水囊土压力计的测试结果具有明显的不同;从测试结果的变化趋势分析来看,水囊土压力计的测试结果可信,且有必要采用水囊土压力计直接贴在模型盾构隧道外壁测试其周围土压力。

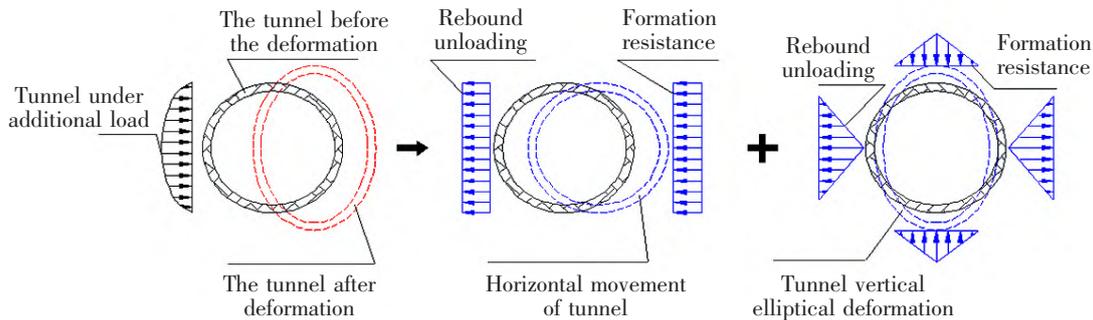


图10 断面4位移与变形分解及与地层相互作用

Fig.10 Decomposition of displacements and deformations at Section 4 and interaction with stratum

4 结论

1) 研制了水囊土压力计,其感压水囊的厚度可根据水囊的大小控制在5~10 mm;通过透明的PU空压软管将感压水囊与电子压力表进行连接。在水囊土压力计使用时需要将电子压力表的高度位置进行固定。

2) 在圆管内壁采用膨润土减磨后进行填土,再将水囊土压力计与土压力盒埋入土中进行了对比试验,结果表明本文提出的水囊土压力计用于测试地层中的土压力是可行的。由于存在一定的厚度,实测土压力偏大问题仍然不可避免,但相对于土压力盒而言,其偏大幅度明显要小。

3) 水囊土压力计与土压力盒对比试验结果表明,在逐步加载过程中,测试元件实测土压力偏大值并非为线性增长,主要与土体在不同加载阶段的压缩性不同有关,同时与应力集中发展到一定程度,测试元件周围的土体颗粒会发生一定的调整变化有关。

4) 将水囊土压力计用于盾构隧道响应模型试验研究中,测得了模型盾构隧道外壁的土压力。从测试结果可知,水囊土压力计与土压力盒的测试结果具有明显的不同;从测试结果的变化趋势分析来看,水囊土压力计的测试结果可信,且有必要采用水囊土压力计直接贴在模型盾构隧道外壁测试其周围土压力。

参考文献:

- [1] 张海丰,马保松,王福芝. 被动土拱效应对土压力计匹配误差的影响[J]. 岩土工程学报,2016,38(2):350-354.
ZHANG H F, MA B S, WANG F Z. Influence of passive

soil arching effect on matching error of earth pressure cells [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (2): 350-354.

- [2] 李超,肖景泽,刘予,等. 基于BOTDR的一种土压力测量管研究[J]. 岩土工程技术,2020,34(4):191-195.

LI C, XIAO J Z, LIU Y, et al. Soil pressure measuring pipe based on BOTDR [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2020, 34(4): 191-195.

- [3] LABUZ J F, THEROUX B. Laboratory calibration of earth pressure cells [J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(2): 188-196.

- [4] PARDO G S, SAEZ E. Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57: 75-84.

- [5] 王继成,龚晓南,田效军. 考虑土应力历史的土压力计测量修正[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(11): 96-102.

WANG J C, GONG X N, TIAN X J. Earth pressure cells measurement correction considering earth stress history [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41 (11): 96-102.

- [6] TALESNICK M L, RINGEL M, AVRAHAM R. Measurement of contact soil pressure in physical modelling of soil-structure interaction [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2014, 14(1): 3-12.

- [7] 简箐,赵国彦,王玺,等. 砂土介质振弦式土压力盒标定试验[J]. 黄金科学技术,2020,28(4):541-549.

JIAN Z, ZHAO G Y, WANG X, et al. Calibration tests of vibrating wire earth pressure cells in sand soil [J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(4): 541-549.

- [8] 任连伟,肖扬,顾红伟. 砂土介质中多类型土压力盒标定试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):155-159.

REN L W, XIAO Y, GU H W. Experimental study on cali-

- bration tests of earth pressure cells in sand soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(2): 155-159.
- [9] TALESNICK M. Measuring soil pressure within a soil mass [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(7): 716-722.
- [10] 刘开源, 许成顺, 贾科敏, 等. 薄膜压力传感器(FSR)曲面土压力测量研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 584-591.
LIU K Y, XU C S, JIA K M, et al. Measurement of earth pressures on curved surface of thin film pressure sensor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 584-591.
- [11] 廖波, 周檀君, 季雨坤. 薄膜式土压力分布传感器研发及试验研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 19-24.
LIAO B, ZHOU T J, JI Y K. Experimental research and development of thin-film soil pressure distribution sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 19-24.
- [12] 黄翔宇, 李顺群, 方大转, 等. 三维土压力盒在原位碾压试验中的应用研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 189-192.
HUANG X Y, LI S Q, FANG D Z, et al. Application research on three-dimensional earth pressure cell in in-situ rolling test[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 189-192.
- [13] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表超载作用下软土地区既有盾构隧道与地层的相互作用分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 95-102.
HUANG D W, ZHOU S H, FENG Q S, et al. Analysis of interaction between existing shield tunnel and stratum under surface surcharge in soft soil region[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 95-102.
- [14] 陶艺冰, 郝彩梦. 机械法地铁联络通道技术体系研究[J]. 电工技术, 2022(20): 179-180.
TAO Y B, HAO C M. Research on technical system of mechanic method for subway communication channel [J]. Electric Engineering, 2022(20): 179-180.
- [15] 赵泽昌, 霍永鹏, 李河山. 机械法开挖地铁联络通道的施工力学响应分析[J]. 市政技术, 2022, 40(1): 1-6.
ZHAO Z C, HUO Y P, LI H S, et al. Analysis of mechanical response of metro connecting channel by mechanical construction[J]. Municipal Engineering Technology, 2022, 40(1): 1-6.



第一作者: 黄大维(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为地铁盾构隧道设计、施工与运维相关的理论与技术。E-mail: gddthdw@126.com。



通信作者: 徐长节(1972—), 男, 二级教授, 博士生导师, 教育部“长江学者”特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, “万人计划”科技领军人才, 国务院特殊津贴获得者。研究方向为深基坑开挖变形控制理论、盾构隧道、饱和土动力学理论及工程应用。E-mail: xucj@zju.edu.cn。

(责任编辑: 吴海燕)