

DX 桩桩周土应力场分布的模型试验研究

唐松涛, 陈立宏, 袁希雨

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

[摘要] 通过室内小比尺的模型试验,可以进一步为确定 DX 桩沉降计算公式提供必要的依据。在小型模型试验箱中,通过采用杠杆加砝码的装置对 22 mm 桩径的 DX 桩在砂土中进行研究,测定单桩的桩顶荷载-桩顶位移曲线,确定承载力,并与相同情况下的直孔桩进行对比;同时,利用微型土压力盒测定土中应力变化,研究荷载在土中的传递规律。试验结果表明,DX 桩的承载力及沉降特性明显优于直孔桩;承力盘在上部和下部时,DX 桩尽管承载力相差不大,但是盘在下部时会增大桩端附近土体的应力;两个承力盘的 DX 桩,两盘受力比较一致,且盘受力的影响范围,在竖向方向大致为 2 倍的盘径;对于 3 个承力盘的 DX 桩,3 个盘附近的土压力扩散范围从上往下逐渐增大,但增加的幅度不大。

[关键词] DX 桩;土压力盒;应力量测

[中图分类号] TU473.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0105-08

1 前言

随着我国铁路尤其是高速铁路的不断发展,对桥梁桩基础的要求越来越高,尤其是对其沉降和变形的控制也越来越严格。传统的直孔灌注桩已经很难满足日益增长的承载力和沉降的要求,因此各种新型的桩基础形式不断涌现。在诸多新型桩中,变截面桩由于能够较好地利用土层的承载力,具有明显的高承载力、低沉降的优势,支盘桩、DX 桩、AM 桩等近年来在工程实践中获得了大量的应用^[1]。早期的 DX 桩是在传统的直孔桩钻孔工艺完成之后,采用专用的三岔挤扩臂挤扩承力盘,而最新的 DX 旋挖挤扩设备集切削、碾压、挤扩为一体,在形成承力盘时能根据地层特点选择相应的施工工艺。例如,密实土层无法挤扩时可采用切削技术,而中密砂土则可采用挤扩与碾压结合的工艺,这一创新使得 DX 桩具备了更好的土层适应性,而且更能充分利用土层的承载力。此外,由于 DX 桩的承力盘上下对称,而且盘腔上下壁与桩身的夹角较大,可超过 60°,与支盘桩和 AM 桩相比,形成同样的盘径所需的纵向高度较小,桩侧摩阻力的损失很小。虽然

DX 桩已在桥梁、房屋、LNG 等行业得到了大量应用,但是其理论研究较少,特别是 DX 桩沉降方面的理论研究大大落后于工程实践,在工程设计中仍沿用实体基础的设计理论。这样的计算方法偏于保守,虽然安全,但却造成了大量的浪费,同时,这种方法使得 DX 桩在控制沉降方面的优势难以发挥。因此,从工作性状、荷载传递特性、设计计算方法等各方面对其展开系统研究显得非常必要和紧迫。

国内许多学者对类似的桩基模型进行了试验研究。笔者之前完成了 DX 桩单桩以及群桩的大比尺模型试验研究^[2-3],通过对比单桩以及群桩中的单桩,证明了 DX 桩在承载力和沉降方面的优势。浙江工业大学的卢成原等进行了支盘桩工作性状的模型试验研究,包括不同土层土质、重复荷载下模型支盘桩工程性状的试验研究^[4-6],通过与等直径模型桩的对比试验表明支盘桩的承载力远远高于等直径桩(约为直孔桩承载力的 2 倍),而沉降变形则要小得多,而且在不同土体中承受荷载和变形能力是完全不同的,多支盘桩的支盘无论是设在相同土层还是不同土层,各个支盘的承载力发挥是不同步的。另外,王科元^[7]、陈志坚^[8]等在进行挤密效应对支

[收稿日期] 2011-12-07

[作者简介] 唐松涛(1984—),男,四川成都市人,北京交通大学博士研究生,主要从事桩基工程方面的研究;E-mail:staotang@bjtu.edu.cn

盘桩承载性能影响的模型试验研究后指出,挤密土支盘桩要远好于非挤密土桩,这就要求在重复试验过程中能较好地控制桩周土的密实程度。叶真华^[9]等对桩身位于淤泥质粘土中而桩端支撑于强持力层(砂土)和弱持力层(粉质粘土)两种情况下桩的承载性状差异进行了室内模型试验研究,结果表明,淤泥质粘土存在应变软化特征;桩端持力层强度越大,桩侧摩阻力增加越大。郑刚^[10]等通过可视化小模型试验,验证了挤扩多盘桩土效应,并进一步确定了土体破坏形式及破坏机理,而且发现,桩距是影响桩土相对滑移量的主要因素,桩距越大,桩身与桩土的相对滑移量就越大,桩端刺入量也越大。

文章通过对室内小比尺模型试验的结果进行分析,主要从土中应力的角度入手,针对不同的DX桩情况埋置土压力盒,以测试土中应力的分布情况,从而进一步为沉降计算提供必要的依据。

2 DX桩模型试验方案

2.1 试验装置

本次试验采用长×宽×高分别为60 cm×60 cm×90 cm的模型试验箱,采用钢板和钢化玻璃制作,其中底板和3个侧边为钢板并通过加劲板加固,另一个侧面为钢化玻璃。加载装置采用杠杆和砝码系统,杠杆固定在刚性的反力架上。

地基土采用砂土,全部过0.63 mm的细筛。控制地基土的孔隙比为0.68,为中密状态。

模型箱实验时采用砂土便于重复,而且便于控制地基土的密实度,使得实验具备良好的可重复性,便于通过多次实验总结规律进行机理研究。但采用砂土也有一定的缺点,即无法模拟DX桩施工中常用的挤扩工艺,实际施工时一定范围内的桩周土会在挤扩压力下被挤密,而模型箱中的砂土很难模拟这一效应。因此,采用砂土进行研究的重点不在于其挤密效应,而在于DX桩这种特殊的桩型结构带来的承载机理和沉降规律。

目前,在铁路桥梁桩基中大量应用的均为大直径长桩,与小直径桩相比,其受力特性等各方面性能均有所区别。为了更好地模拟大直径长桩,采用长径比25:1作为模型试验几何比尺的控制条件。采用铝管作为桩身材料,铝管的直径为22 mm,壁厚为3 mm,桩底采用铝合金块进行封底,以保证桩身的完整性;桩长为650 mm,其中有效桩长为500 mm;承力盘的模拟材料同样采用铝材,直径为50 mm,制

作时将铝棒切割成承力盘的形状并用销钉与桩身连接成一体,见图1。模型桩的具体参数见表1。

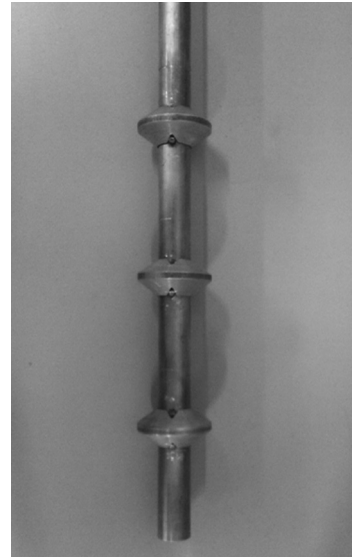


图1 模型桩实物图

Fig. 1 Model pile

表1 模型桩的具体参数

Table 1 Parameters of model piles

模型类型	桩长/mm	有效桩长/mm	桩径/mm	承力盘直径/mm	承盘数/个	盘位埋深/mm
DX1	650	500	22	50	1	-430
DX2	650	500	22	50	1	-230
DX3	650	500	22	50	2	-230、-430
DX4	650	500	22	50	3	-230、-330、-430
S1	650	500	22	—	—	—

试验的量测系统主要包括以下几个部分:

1) 应变式压力传感器,精确测量施加在桩顶的荷载值,设置在桩头与加载装置之间。试验中采用定制的应变式压力传感器,最大量程为5 kN,精度为1% F.S。

2) 百分表,测量点为桩顶引伸出的钢片上,保证测量部位的位移真实反映桩顶沉降,而不受到其他连接部位的影响。

3) 应变式微型土压力盒,测量土中的应力变化,布置在桩身尤其是承力盘周围。土压力盒为定制产品,直径为28 mm,厚度10 mm,量程为0~500 kPa,灵敏度为≤0.1% F.S。采用自制的高300 mm,直径150 mm的圆柱形钢桶,将土压力盒埋入与模型试验相同的密实度的砂土中,采用多级砝码加载率定土压力盒的系数^[11-15],结果发现砂标的结果与出厂标定的结果误差较小,最大的误差为

7% ,因此在本次试验中,直接采用土压力盒的出厂标定系数进行土压力的计算。

2.2 试验方案

进行了直孔桩、3个盘的DX桩以及一个盘的DX桩3组试验,见表2。

表2 试验方案
Table 2 Test scheme

组号	桩类型	土压力盒埋设方案	试验桩编号
1	无	DX3-1,DX3-2	
	S1	无	S1-1,S1-2
	DX1a	见图2(a)	DX1a-1,DX1a-2
2	DX1b	见图2(b)	DX1b-1,DX1b-2
	DX2	见图2(c)	DX2-1,DX2-2
4	DX3	见图2(d)	DX3-3

所有的模型桩均采用预埋的方法设置。在填土时,先将模型桩固定在木制夹具中定位,放置在试验箱的预定部位,保证桩身轴线垂直。再往试验箱中分层填土并夯实,每一层砂用量为一桶,大约23 kg,先将砂面抚平,然后用自制的击锤满铺夯实两遍。

当砂面到达预埋土压力盒的高度时,将土压力盒按照设计部位埋入,用砂压实,再继续填土,直至预设高度。静置模型装置12 h 然后进行试验。微型土压力盒的埋设部位为桩底与桩底正下方的位置,以及与正下方的土压力盒间隔30 mm 的部位,土中应力的测点布置见图2。

3 试验结果分析

3.1 各组试验 $Q-s$ 曲线结果的分析

图3为直孔桩(S1)与3个承力盘DX桩(DX3)的 $Q-s$ 曲线。由图可以看出,在相同的桩长和桩径的条件下,DX桩的 $Q-s$ 曲线呈现明显的缓变型。当沉降达到1 mm 时,直孔桩的承载力约为500 N,而DX桩的承载力高达1 800 N左右。由于采用铝管作为桩身材料,表面较为光滑,桩土之间的摩擦力比实际情况偏小,从而导致直孔桩的承载力偏小。而对于DX桩,由于其承力盘的作用,在侧摩阻力减小的情况下,承载力仍可以稳定在较高水平。

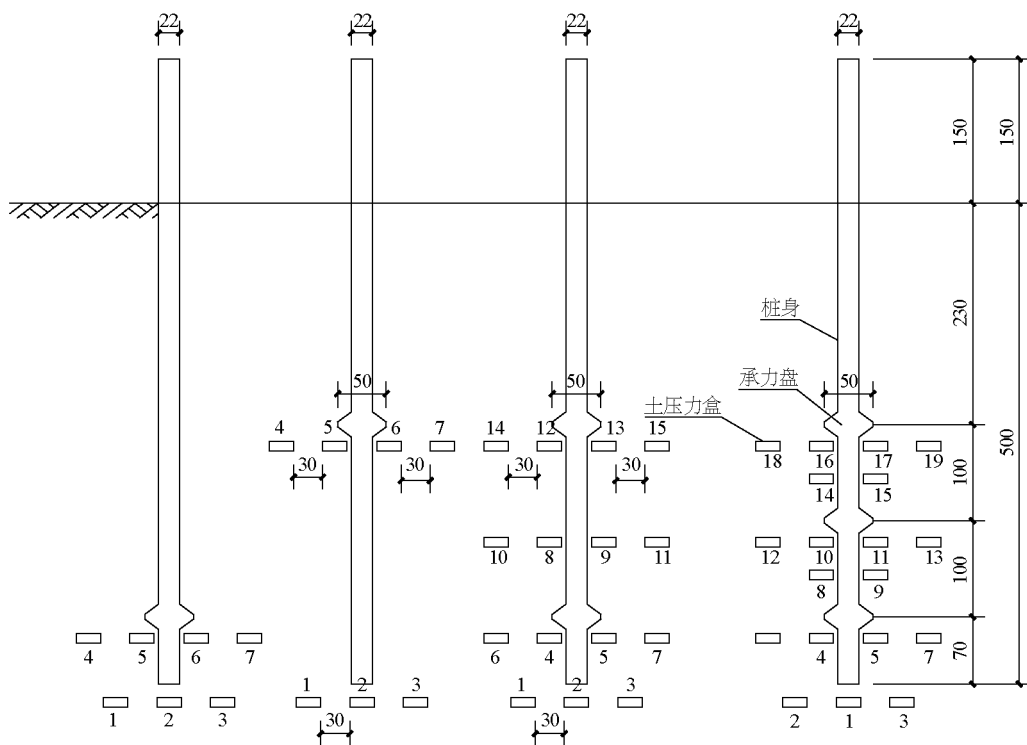


图2 土中应力测点布置图

Fig. 2 Layout of measuring point in soil

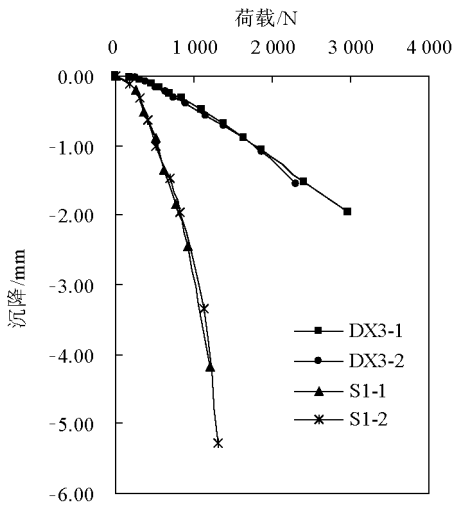


图3 直孔桩与DX桩(3个盘)的 $Q-s$ 曲线
Fig.3 $Q-s$ curves of straight piles and DX piles (three bells)

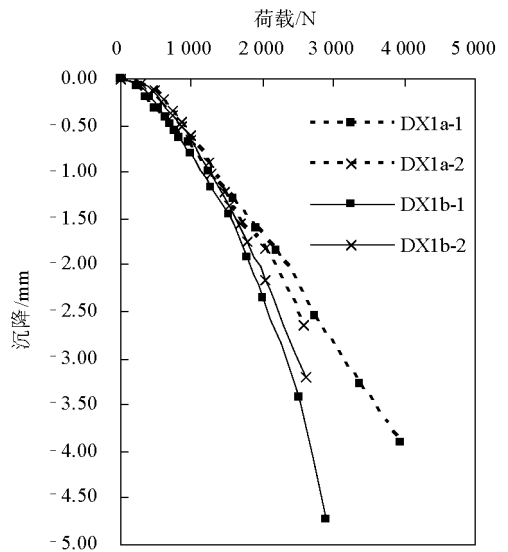


图4 一个承力盘的DX桩的 $Q-s$ 曲线
Fig.4 $Q-s$ curves of DX piles with one bell

图4为一个承力盘的DX桩(DX1a和DX1b)的 $Q-s$ 曲线,图中虚线为承力盘在下部的情况即DX1a,实线为承力盘在上部的情况即DX1b。从图5可以看出,两种情况的 $Q-s$ 曲线差别不大。但是,承力盘在下部的情况会略优于承力盘在上部的情况。造成这种差别的原因在于,地基土每一层都采用相同的条件进行控制,但下部的土体由于上覆土层的影响,会比上部土体稍密实,承载力则相应提高,承力盘位于该层土体时所提供的承载力也相应提高。同时,亦可认为,承力盘作用的发挥虽然受到从上到下的顺序效应的影响,但是在仅有一个承力盘的情况下,承力盘埋深对于承载力的发挥并没有直接的影响。

图5为直孔桩与不同情况DX桩的 $Q-s$ 曲线。这些DX桩包括3个承力盘的DX桩、两个承力盘的DX桩、一个承力盘但盘位分别在上下两种情况的DX桩。从图5可以清楚地看出,无论哪种情况的DX桩,与直孔桩相比,承载力的提高和沉降的控制效果都是非常明显的;随着盘数的增加,DX桩承载力也逐渐提高,且沉降控制的效果越好。

3.2 一个承力盘的DX桩的土中应力分布

为了进一步研究DX桩桩周土的受力情况,在盘周埋设了土压力盒。一个承力盘的DX桩的测点布置见图2(a)和(b)。此处分别选取DX1a-1和DX1b-2的试验结果来进行对比分析,见图6和图7。

结果表明,桩端下部的土压力盒受力最大,其次

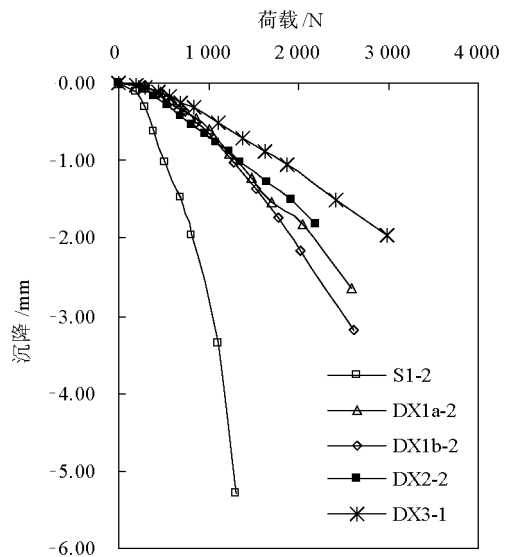


图5 直孔桩与不同情况DX桩的 $Q-s$ 曲线
Fig.5 $Q-s$ curves of straight pile and DX piles

为盘下部的两个土压力盒,而盘外侧的土压力盒受力最小。对比两个图可以看出:

1) 当位移均为3 mm时,盘在下部的DX桩(DX1a),盘底的土压力要大于相同情况下盘在上部的情况(DX1b)。盘在下部的时候压力大致为120 kPa,而盘在上部时平均压力只有30 kPa。这与通过 $Q-s$ 曲线得出的分析结果是一致的。

2) 桩底量测的土压力盒结果,盘在下部的DX桩的压力平均为45 kPa,而盘在上部时仅为7 kPa左右。从这个结果可以看出,当盘在上部时,桩端两

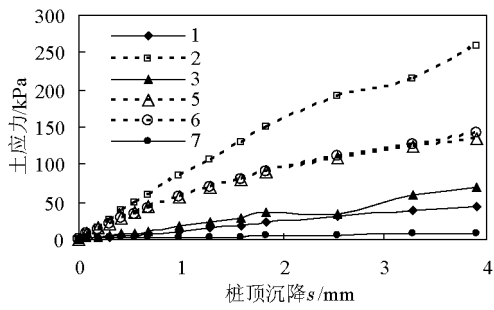


图6 模型桩 DX1a-1 的土压力盒测试结果
Fig. 6 Results of earth pressure cells of DX1a-1

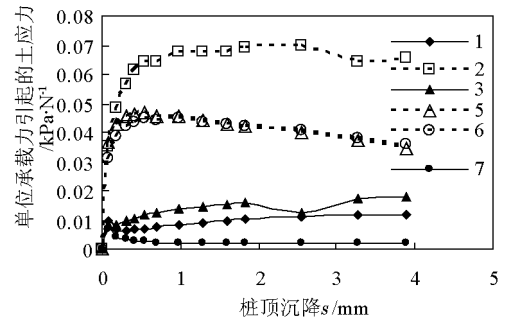


图8 DX1a-1 的单位承载力引起的土中应力
Fig. 8 Soil stress per unit load force of DX1a-1

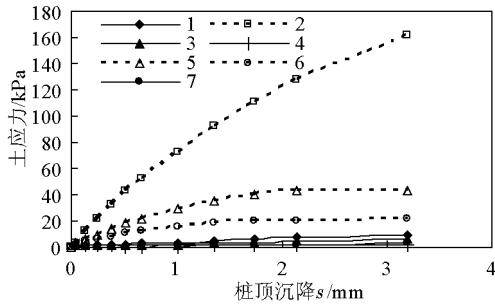


图7 DX1b-2 的土压力盒测试结果
Fig. 7 Results of earth pressure cells of DX1b-2

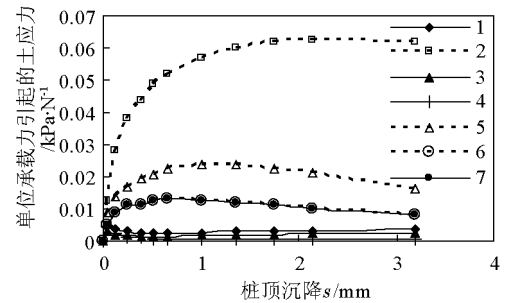


图9 DX1b-2 的单位桩顶荷载引起的土中应力
Fig. 9 Soil stress per unit load force of DX1b-2

侧的土压力盒仅受到来自桩端的微弱影响;而当盘位于下部时,桩底量测的土压力盒明显受到来自承力盘荷载的影响,使其压力值比盘在上部时高出数倍。承力盘在下部时,承力盘离桩端的测点的距离大约为4倍的桩径,可见承力盘的竖向影响范围大于4倍的桩径。

3) 承力盘两侧的土压力盒的测试结果表明,无论盘在上部还是下部,其结果相差不大,均在6~9 kPa 这个范围内。可以认为这两个测点基本位于承力盘影响扩散范围边缘,受到承力盘的影响很小。

将上述结果与桩身承载力相比较,得出单位承载力引起的土中应力与桩顶沉降之间的关系图,见图8和图9。

单位承载力引起的桩端土压力随着位移的增加逐渐增加,而到了一定的阶段,盘在上部时为2 mm,盘在下部时为1 mm,该值趋于稳定。单位承载力引起的承力盘下的土压力能够较快的达到峰值,随后便开始下降。随着位移的增加,尽管总的桩顶荷载在增加,但是单位荷载引起的土中应力没有继续增长,而是呈现下降趋势。由此可以说明承力盘附近的力随着位移的增加开始向四周扩散,盘周土发挥了巨大的作用,而对于桩端两侧和盘两侧测点的土

中应力占总比例一开始便出现峰值,随后略有下降并趋于稳定。

3.3 两个承力盘的 DX 桩的土中应力分布

两个承力盘的 DX 桩试验共进行了两次,且两次试验的数据结果较为一致,因此选取 DX2-2 的试验结果进行分析。DX2-2 桩的土压力盒测试结果见图10~图12。

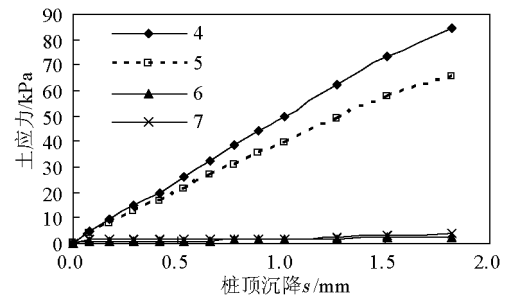


图10 DX2-2 下部承力盘土压力盒测试结果
Fig. 10 Results of earth pressure cells of lower bell of DX2-2

从图10和图12中可以看出,上下两个承力盘周围的土压力盒受力比较一致。当桩顶位移达到1.82 mm时,承力盘正下方的土压力盒受力在60~

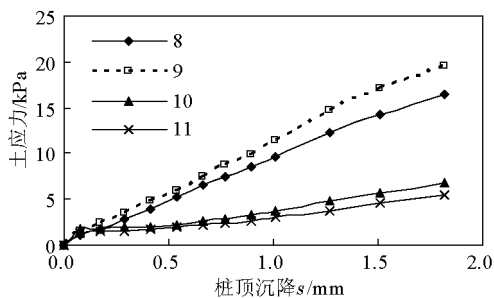


图 11 DX2-2 承力盘中间的土压力盒测试结果

Fig. 11 Results of earth pressure cells between two bells of DX2-2

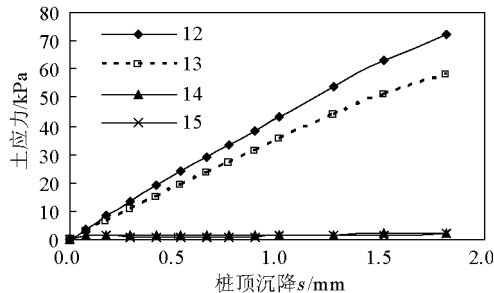


图 12 DX2-2 上部承力盘土压力盒测试结果

Fig. 12 Results of earth pressure cells of upper bell of DX2-2

80 kPa 之间,两侧的土压力盒受力很小,数值上最大值小于 4 kPa,与正下方土压力盒的受力相比可以忽略。

上下两个承力盘中间的土压力盒受力也比较明显(见图 11)。靠近桩身的两个土压力盒受力在 15~20 kPa 之间,而外侧的土压力盒受力分别为 5.5 kPa 和 7.0 kPa。外侧土压力盒的测试结果略大于承力盘下方两侧的土压力盒结果。该结果可以表明,承力盘对力的扩散作用还是比较明显的,而外侧土压力盒的受力可以认为主要由承力盘的受力引起。目前,由于该位置距承力盘有两倍盘径的距离,故受力已经很小,可以认为承力盘引起的受力在竖向的扩散范围为 2 倍的盘径。靠近桩身的土压力盒测试结果包含了两方面的受力,一个是侧阻引起的受力,另一个是上部承力盘引起的受力。目前还不能很好地区分这两部分受力,需进一步进行对比试验。

3.4 3 个承力盘的 DX 桩的土中应力分布

图 13 为 3 个承力盘的 DX 桩,即 DX3-3 各盘正下方的土压力盒的受力情况。从图 13 可以看出,

当位移达到 1.8 mm 时,下部承力盘的受力最大,数值上大于 100 kPa,而上部承力盘下方的土压力盒受力最小,大致在 60 kPa 左右,两者相差较大,达到 40%。而两个承力盘的 DX 桩在相同位移下,相同位置上的土压力均在 60~80 kPa 之间,说明 3 个承力盘的 DX 桩承载力提高,导致了下盘受力增大,从而引起下盘周围土中应力的增长,而上盘基本上维持和两个盘 DX 桩一致的水平。

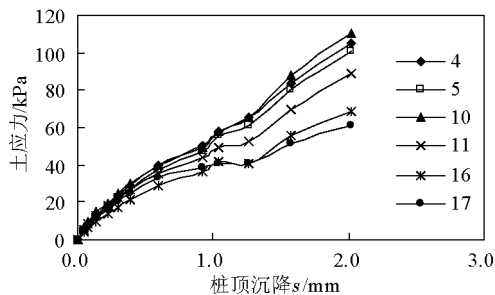


图 13 DX3-3(3 盘)各盘正下方土压力盒测试结果

Fig. 13 Results of earth pressure cells under each bell of DX3-3

图 14 为 3 个盘的 DX 桩上盘和中盘正下方约 1 倍盘径处的土压力盒的受力情况。从图中可以看出,1 倍盘径处土中应力仍然处于较高的水平,尤其是中盘下方的土应力,仍然有 70 kPa 左右,土中应力衰减较慢,而上盘下方的土应力相对较小,大致在 30~40 kPa 之间。

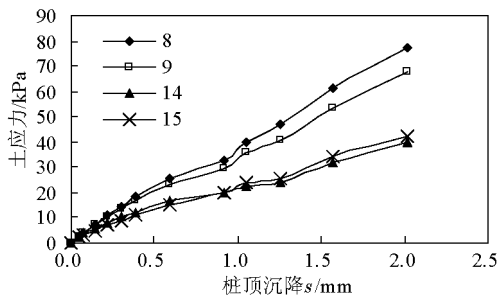


图 14 DX3-3(3 盘)各盘正下方 1 倍盘径处土压力盒结果

Fig. 14 Results of earth pressure cells under each bell about 1 bell diameter of DX3-3

4 结语

经过上述分析,可以得出以下几条结论:

1) 在砂土材料的地基土中,DX 桩的承载力及

沉降特性明显优于相同情况下的直孔桩,但小比尺试验中直孔桩的侧摩阻力偏小造成承载力比实际偏小,而 DX 桩承力盘作用明显,在侧阻偏小的情况下仍能维持比较高的承载力。

2)DX 桩承力盘的不同位置(上部和下部)对承载力的影响不明显,设置在下部时承载力略高。但是承力盘设置在上部时,承力盘引起的土中应力仅在一定深度范围内扩散,不会扩散至桩底,而盘在下部时,由于扩散距离有限,会引起桩端附近的土体应力增大,且桩轴线下方土体的应力亦会增加。

3)对于两个盘的 DX 桩,上下盘的受力比较一致,土中应力分布情况也相似。试验结果表明,承力盘受力引起的土中应力分布在竖向方向大致在 2 倍的盘径左右。

4)对于 3 个盘的 DX 桩,3 个盘周围的土体应力扩散范围从上往下逐渐增大,但是幅度较小。随着桩顶荷载的增大,在相同位移的情况下,下部承力盘周的土体应力与两个承力盘的 DX 桩相比受力更大。

参考文献

[1] 沈保汉,贺德新,刘振亮,等. DX 多节挤扩桩的产生及特点[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 1-4.

[2] 陈立宏,唐松涛,贺德新. DX 桩群桩现场实验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1003-1007.

[3] Tang Songtao, Chen Lihong. Field test of DX pile group. International conference on civil engineering, architecture and building

materials [C]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2011.

[4] 卢成原,王志军,孟凡丽. 不同土质中模型支盘桩在重复荷载作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 3141-3147.

[5] 李天宝,卢成原,王科元. 支盘桩工作性状的模型试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(3): 290-294.

[6] 卢成原,贾颖栋,周玲. 重复荷载下模型支盘桩工程性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 431-436.

[7] 王科元,朱兴海,卢成原. 挤密效应对支盘桩承载性能影响的模型试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(1): 53-57.

[8] 陈志坚,刘艳军. 超长灌注桩对桩周土挤密作用的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3277-3281.

[9] 叶真华,周健,唐世栋. 粘土中不同桩端条件下桩承载性状的模型试验[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(6): 733-737.

[10] 郑刚,裴颖洁,刘双菊. 竖向荷载作用下桩筏基础可视化模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2912-2918.

[11] Gregory S Wachman, Joseph F Labuz. Soil-structure interaction of an earth pressure cell[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2011, 137(9): 843-845.

[12] 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.

[13] Labuz J F, Theroux B. Laboratory calibration of earth pressure cells[J]. ASTM Geotech Test J, 2005, 28(2): 188-196.

[14] Selig E T. Soil stress gage calibration[J]. ASTM Geotech Test J, 1980, 3(4): 153-158.

[15] Weller W A Jr, Kulhawy F H. Factors affecting stress cell measurements in soil[J]. J Geotech Eng Div, 1982, 108(GT12): 1529-1548.

Model test study on surrounding soil stress distribution of DX pile

Tang Songtao, Chen Lihong, Yuan Xiyu

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[**Abstract**] Through small scale model test of DX piles in lab, the test results can provide necessary basis for computing formula of settlement. A series of tests about DX piles with 22 mm diameter in sand are carried out in a small test chamber with the loading frame; the $Q-s$ curves are derived, and then the bearing capacities are determined and compared with the straight piles in the same condition. At the meantime, miniature earth pressure cells are installed to test the stress in the surrounding soil of DX piles, so that the load transfer law in the soil can be researched. The test results show that the capacity and settlement characteristics of DX pile are much superior to the straight pile with the same parameters. For the single-bell DX pile, the location of the bell has barely effect on the capacity. However, when the bell locates on the lower part of pile shaft, the stress of soil around the pile tip increases a lot. For two-bell DX pile, the stresses around the two bells are similar, and the range of soil stress induced by bells in vertical is around two times of bell diameter. For the DX pile with three bells, the soil stress around the bells spread increasingly, while the amplitude is small.

[**Key words**] DX pile; earth pressure cell; stress measurement