

透水管桩的群桩沉桩室内模型试验研究

黄勇¹,梅国雄^{1,2},王钰轲³

(1.南京工业大学交通学院,江苏南京210009;2.广西大学土木建筑工程学院,广西南宁530004;3.河海大学土木与交通学院,江苏南京210098)

摘要:本文基于室内模型试验,通过透水管桩和普通管桩沉桩模型试验对比,探究群桩情况下,透水管桩加速桩周土超静孔隙水压力消散的效果和规律。通过试验表明透水管桩更有利于桩周土超静孔压消散,其促进作用沿深度方向递增,沿水平方向递减。透水管桩阻碍了沉桩完成后桩周土超静孔隙水压力的上升,从超静孔隙水压力产生的角度出发,降低了桩周土超静孔隙水压力的峰值,控制了整个桩周土超静孔隙水压力的水平,有利于超静孔隙水压力后期的消散。表明沉桩施工中,透水管桩提高了施工进度,降低了对周围环境的影响。

关键词:透水管桩;超静孔压;室内模型实验

中图分类号:TU4

文献标识码:A

Laboratory model experimental investigation of permeable pipe piles

HUANG Yong¹, MEI Guoxiong^{1,2}, WANG Yuke³

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: Based on laboratory model test, the promotion in effect and law of the dissipation process of excess pore water pressure by permeable pipe pile. Compared permeable pipe pile with normal pipe pile model experiment, the evidently positive effect on the dissipation of excess pore water pressure could be found in permeable pipe pile model test. The impact scope of the soil mass in the middle and lower part was the depth direction, decreasing along the horizontal direction. Permeable pipe pile in the dissipation of excess water pore pressure had the most obvious effect on the early period, greatly speeding up the construction progress. It is found that the excess pore pressure evidently reduced in the soil around the pile at the initial time of drainage pile completed. In the process of pile driving construction, the permeable pipe pile improves the construction schedule and reduces the influence on the surrounding environment.

Key words: permeable pipe piles; excess pore water pressure; Laboratory model test

东部沿海地区存在大量软土地基,其承载力较低,无法满足上层建筑的要求,需要桩基础来解决问题。静压桩越来越受到人们的欢迎。静压桩具有质量可靠、承载力高、施工方便且环保等特点得到广泛应用。但静压桩在沉桩施工过程中,由于桩的贯入挤土,桩间土往往会产生较高的超静孔隙水压力^[1-5]。由于饱和软粘土的渗透性差,

超静孔隙水压力消散缓慢,进而妨碍施工进度,影响桩基承载力时效性的发挥以及周边环境。为了减小沉桩过程中产生的挤土效应,国内学者对减小沉桩挤土效应的措施进行了大量研究^[6-12]。目前透水管桩研究还处于理论阶段,本文以周小鹏^[13-14]透水管桩数值模拟研究为基础,进行室内模型实验^[15],通过对比普通管桩和透水管桩群桩

沉桩后桩周土超静孔压的消散情况,得出透水管桩加速超静孔压消散的效果和规律。

1 模型试验设计

1.1 试验设备材料

透水管桩沉桩模型试验在模型箱内进行,模型箱尺寸为 2 000 mm × 2 000 mm × 1500 mm (高),由角钢和钢板焊接而成。试验土体取自温州欧飞围垦工程现场吹填土,在室内模型箱内进行真空预压处理,固结时间为两个月。由于本文不涉及桩身强度的研究,可选用塑料管作为模型桩材料。透水管桩模型由塑料管冲压钻孔加工而成,外表面粘贴滤布,下端口固定锥形塑料接头。其尺寸参数:管桩长度 L 为 900 mm,管桩直径 D 为 60 mm,开孔直径 d 为 6 mm ($1/10D$),开孔间距 36 mm ($6d$)。该模型桩设有内部套管,为塑料圆管,外径略小于透水管桩内径。透水管桩沉桩前,提前将套管塞入透水管桩内部,从内堵住透水管桩桩身透水孔,防止沉桩过程中桩周土体受挤堵住透水孔和进入管桩内腔,影响透水管桩的透水效果。本试验采用 YH-30301A 型号孔压计,量程 0.1 MPa,温度范围 $-20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$,直径 25 mm,长度 170 mm。

1.2 试验过程

将土体运回实验室后,倒入模型箱内,高度达 140 mm 左右,用搅拌器搅拌均匀。吹填淤泥土样整平之后,将塑料排水板固定在内置钢架四个角上。设置钢架的主要目的是用来固定排水板,防止排水板在真空预压的过程中发生较大位移和弯折。排水板间距为 80 mm。接着将内置钢架缓慢地压入模型箱中心。然后在土体表面铺设一层土工编织布,随后使用三通接头将钢丝软管连接到塑料排水板上,接着在土体表面铺设一层土工布,使用两层塑料薄膜进行密封,将钢丝软管连接真空泵,完成整个装置的连接。启动真空泵,进行真空预压处理,待土体沉降和孔隙水压力基本稳定时,真空预压处理结束。

土体真空预压处理后,进行孔压计的埋设,孔压计三个一组,绑在 1 m 长的钢筋上,共六组。图 1 为孔压计及桩位分布示意图。群桩试验孔压计的埋设点位分布在群桩内部、边界和外部。内部为群桩中心,边界为相邻两根桩连线中点,桩外在

群桩外 120 mm ($2D$) 处,水平向三个点位成一条直线,间距相等,均为 120 mm ($2D$)。孔压计竖向分三个高度埋设,分别离土体表面 200、450、700 mm。孔压计埋设完成后,测量孔压计读数,待孔压计读数稳定时,既土体恢复到静孔隙水压力,即可进入压桩环节。群桩试验的压桩点位如图 1 所示。桩间距为 240 mm ($4D$),成正方形布置,位于模型箱中央。

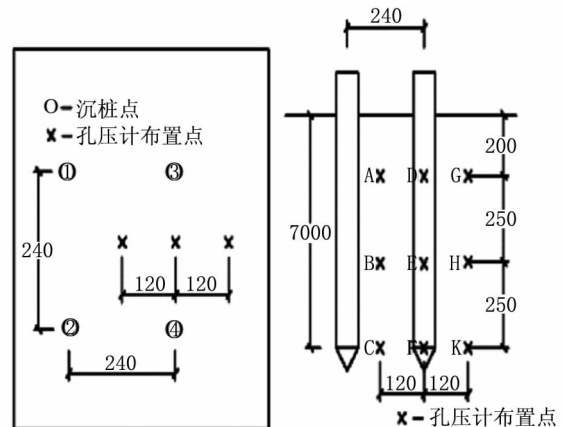


图 1 孔压计及桩位分布示意图 (单位: mm)

Fig.1 Distribution of pore pressure gauge and piles

对于本次群桩试验,桩是一根一根按顺序打入土体中,待全部透水管桩沉入土体后,同时抽出内管,实现排水。如果每根桩沉桩完成时立即抽出内管,无法保证模型箱 1、2 中桩周土超静孔隙水压力产生过程的一致,因此无法保证透水管桩和普通管桩对比初始条件的基本相同,不便于透水管桩和普通管桩的对比。对于群桩试验,桩周土超静孔隙水压力随沉桩数量的增多而不断累加,这要求每沉入一根桩,随即测量桩周土各测点超静孔隙水压力值,了解桩周土超静孔隙水压力产生的过程。

2 实验结果分析

2.1 群桩沉桩过程中桩周土超静孔隙水压力变化情况

群桩情况下,桩周土超静孔隙水压力的产生是每根桩共同作用的结果。每沉入一根桩,桩周土超静孔隙水压力相应增大。表 1 为模型箱 1 中普通管桩沉桩过程中,各测点超静孔隙水压力变化情况。表 2 为模型箱 2 中透水管桩沉桩过程中,各测点超静孔隙水压力变化情况。由表 1 表 2 看出,沉桩过程中,模型箱中各测点超静孔隙水压

力随着沉桩数量的增多而不断增大。当沉入第一根桩时,类似于单桩沉桩试验;桩周土离桩越近,产生的超静孔隙水压力越大;深度越深,产生的超静孔隙水压力越大。体现在 C 测点产生的超静孔隙水压力最大,G 测点产生的超静孔隙水压力最小。沉入第二根桩时,各测点超静孔隙水压力值继续增大,但增大值小于第一根桩沉桩产生的超静孔隙水压力值。沉入第三根桩时,群桩边界上各测点超静孔隙水压力突然猛增,这是由于群桩边界上测点离第三根桩最近。同理,由于第三根桩较前两根桩离群桩外各测点较近,所以群桩外各测点超静孔隙水压力增长值较前两根桩变化较大。值得一提的是沉入第四根桩后,群桩内中部及下部测点(B、C 测点)和群桩边界中部及下部测点(E、F 测点)超静孔隙水压力突然减小,其他各测点超静孔隙水压力正常增大。

2.2 透水管桩和普通管桩沉桩完成后超静孔隙水压力上升阶段对比

沉桩结束后,由于桩周土超静孔隙水压力传递滞后效应,各测点(B、E 测点除外)超静孔隙水

压力并没有立即消散,而是在一段时间内上升到峰值。这段时间为沉桩结束后 3 h 之内。

表 1 表 2 中给出第四根桩完成后 3 h 时,各测点超静孔隙水压力值的大小。这一时刻桩周土各测点超静孔隙水压力增长也基本结束。表 3 为透水管桩和普通管桩 3 h 内桩周土各测点(B、E 点除外)超静孔隙水压力的上升值。对比透水管桩和普通管桩沉桩后桩周土各测点超静孔隙水压力上升情况,可以发现,透水管桩 3 h 内超静孔隙水压力上升值明显小于普通管桩。如测点 F,在透水管桩条件下超静孔隙水压力上升 1.1 kPa,在普通管桩条件下超静孔隙水压力上升 1.8 kPa,两种情况相差多达 0.7 kPa。C 点相差 0.5 kPa 之多,K 点相差 0.3 kPa,其他测点相差较小。可见透水管桩阻碍了超静孔隙水压力的上升,降低了桩周土超静孔隙水压力的峰值,有利于超静孔隙水压力后期的消散。

透水管桩发挥作用的原因为:第四根桩完成后,由于超静孔隙水压力传递的滞后性,各测点超静孔隙水压力处于缓慢上升阶段。此时透水管桩开始排水,加速了超静孔隙水压力的就地消散,将

表 1 普通管桩沉桩过程中超静孔隙水压力产生情况

Tab.1 The formation of excess pore water pressure in the process of common pipe pile sinking

工况	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	K1
初始	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第一根	0.9	2.7	3.3	0.5	1	1.5	0.1	0.5	1.1
第二根	1.5	3.8	5.8	0.8	1.7	2.1	0.2	1	1.6
第三根	2.1	5.2	6.6	1.5	3	4	0.8	2	2.8
第四根	2.5	4.8	5.9	2	2.6	3.4	1.3	2.8	3.8
3 h 后	2.7	4.6	7.1	2.2	2.5	5.2	1.4	3.1	4.4

表 2 透水管桩沉桩过程中超静孔隙水压力产生情况

Tab.2 The generation of excess pore water pressure in the process of permeable pipe pile sinking

工况	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	K2
初始	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第一根	0.9	2.6	3.2	0.2	0.9	1.3	0.2	0.4	1.2
第二根	1.3	3.9	5.6	0.5	1.8	1.8	0.4	0.8	1.5
第三根	2	5.1	6.2	1.4	2.9	3.9	0.8	1.7	2.8
第四根	2.3	4.7	5.7	1.9	2.7	3.2	1.5	3	4
3 h 后	2.3	4.2	6.5	2.0	2.2	4.3	1.5	3.2	4.3

表 3 普通管桩和透水管桩 3 小时内各测点超静孔隙水压力的上升值

Tab.3 The rising value of the excess pore water pressure of the test points in the 3 hours of the ordinary pipe pile and the permeable pipe pile

工况	A	B	C	D	E	F	G	H	K
普通管桩	0.2	-0.2	1.3	0.2	-0.1	1.8	0.1	0.3	0.6
透水管桩	0	-0.5	0.8	0.1	-0.5	1.1	0	0.2	0.3

桩边部分超静孔隙水压力消散,减少了超静孔隙水压力向远处的传递量。从超静孔隙水压力产生的角度出发,透水管桩降低了各测点超静孔隙水压力的峰值,控制了整个桩周土超静孔隙水压力的水平,减小了沉桩挤土效应。

2.3 透水管桩和普通管桩在超静孔隙水压力消散阶段的对比

沉桩结束后,桩周土各测点超静孔隙水压力在 3 h 内先后上升到峰值,接着进入超静孔隙水压力消散阶段。图 2 为普通管桩各测点超静孔隙水压力消散曲线,图 3 为透水管桩各测点超静孔隙水压力消散曲线。图 2、图 3 中可以看出:桩周土底部测点(C、F、K 点)产生的超静孔隙水压力较大,桩周土上部测点(A、D、G 点)产生的超静孔隙水压力较小,反映沉桩完成后,桩周土超静孔隙水压力沿深度方向增加。

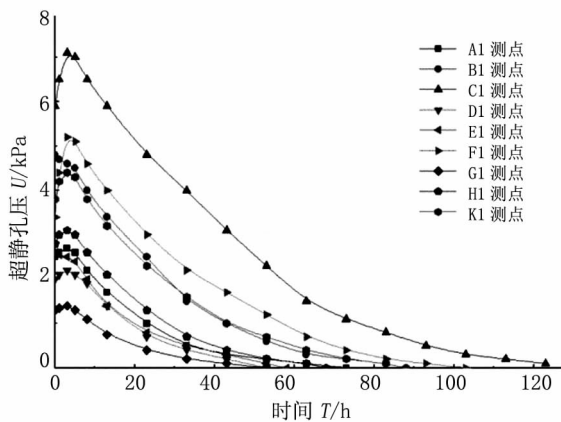


图 2 普通管桩各测点超静孔隙水压力消散曲线

Fig.2 The dispersion curve of the excess pore water pressure of the ordinary pipe pile

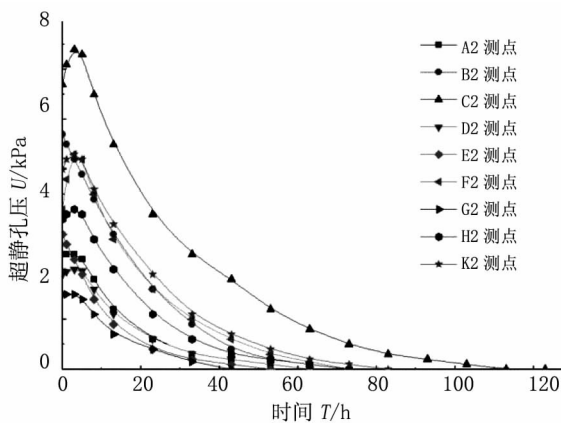


图 3 透水管桩各测点超静孔隙水压力消散曲线

Fig.3 The dispersion curve of the excess pore water pressure of the permeable pipe pile

其中群桩内底部测点 C 超静孔隙水压力值最

大,群桩边界底部测点 F 超静孔隙水压力值次之,群桩外底部测点 K 超静孔隙水压力值为第三。反映了沉桩完成后,群桩内部挤土效应最为严重,群桩边界挤土效应次之,群桩外挤土效应最小。从消散过程来看,群桩下部土体消散速度较快,但由于超静孔隙水压力初始值较大,消散时间较长,最久需要 120 h。群桩上部土体消散速度稍慢,但由于超静孔隙水压力初始值较小,消散时间较短,基本 50 h 左右消散完成。

群桩内部和群桩边界的中部土体较特殊,沉入第四根桩时,超静孔隙水压力突然减小,随后并未反弹增大,导致超静孔隙水压力值偏小,接近上部土体超静孔隙水压力值,消散时间明显减小,这与单桩中部土体的超静孔隙水压力消散规律不同。群桩外中部土体超静孔隙水压力产生和消散过程均反映出跟单桩相同的规律。

图 2、图 3 中各测点超静孔隙水压力消散曲线初始阶段较陡,反映初始阶段超静孔隙水压力消散速度较快,后期阶段曲线较平缓,反映固结后期超静孔隙水压力消散较慢。图 2、图 3 超静孔隙水压力消散曲线基本吻合桩周土固结规律,反映了试验过程的正常进行和数据的可靠性,保证了接下来试验对比的可行性。

第四根桩沉桩完成后,模型箱 1、2 中各测点超静孔隙水压力初始值并非完全相同,但误差不超过 0.2 kPa,不影响透水管桩和普通管桩的对比。为方便直观的比较透水管桩和普通管桩的超静孔隙水压力消散曲线,将两者相同测点的超静孔隙水压力初始值调整为相同值。图 4 为调整超静孔隙水压力初始值后,普通管桩和透水管桩各测点超静孔隙水压力消散对比曲线。(a)、(b)、(c)分别为桩周土体上部、中部,下部各测点的超静孔隙水压力消散对比曲线。(d)、(e)、(f)分别为群桩内部、群桩边界、群桩外部各测点的超静孔隙水压力消散对比曲线。

图 4 可以看出透水管桩桩周土各测点超静孔隙水压力消散曲线均位于普通管桩相应曲线之下,说明透水管桩桩周土超静孔隙水压力消散速度快于普通管桩,显示出透水管桩对于桩周土超静孔压消散的加速作用。可以发现,在桩周土超静孔隙水压力消散前期,透水管桩和普通管桩超静孔隙水压力消散曲线间距较大,表示透水管桩的加速作用最明显;在桩周土超静孔隙水压力消散后期,透水管桩和普通管桩超静孔隙水压力消

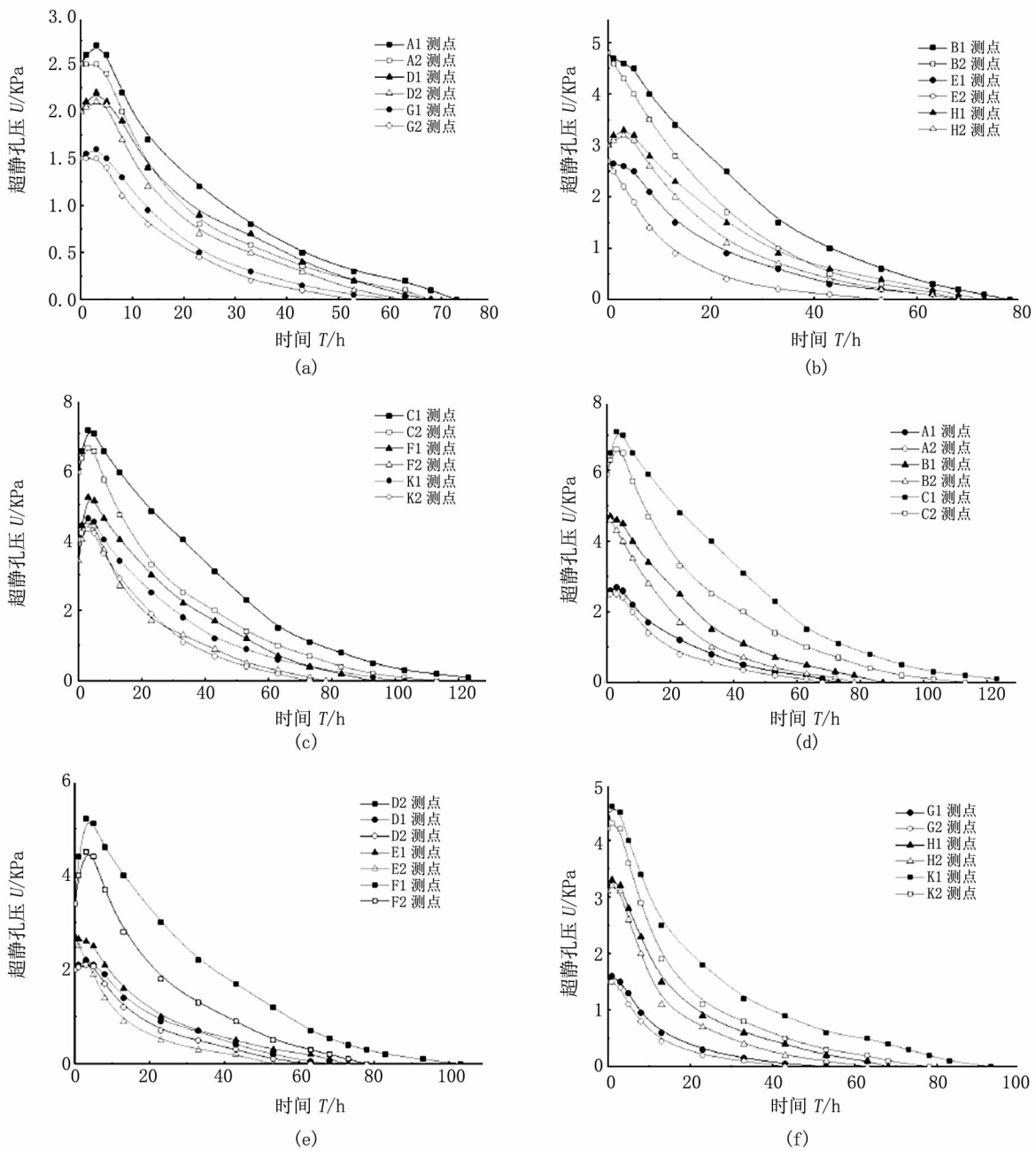


图4 普通管桩和透水管桩各测点超静孔隙水压力消散对比曲线

Fig.4 Contrast curve of excess pore water pressure dissipation at each measuring point of ordinary pipe pile and permeable pile

散曲线间距较小,表示透水管桩的加速作用慢慢衰退。这与超静孔隙水压力消散规律相吻合,因为固结前期,超静孔隙水压力消散较快,在此基础上透水管桩更能发挥作用。而固结后期,超静孔隙水压力消散已经很缓慢,导致透水管桩的加速作用不明显。

每个测点,两条曲线围成的区域大小,代表该测点透水管桩加速超静孔隙水压力消散的程度。区域面积越大,代表加速效果越好。从图4(a)、(b)、(c)可以看出,无论是上部,中部还是下部土

体,都反映出透水管桩在群桩条件下加速超静孔隙水压力消散的规律:群桩内及群桩边界,透水管桩加速超静孔隙水压力消散的作用较大,群桩外透水管桩加速超静孔隙水压力消散的作用稍小。这是因为群桩内部和群桩边界土体超静孔隙水压力相对较大,且离透水管桩的距离较近,所以超静孔隙水压力消散的加速效果较好。

由图4(d)、(e)、(f)可以看出,无论是群桩内部、群桩边界还是群桩外部,都反映出统一的规律,即底部土体超静孔隙水压力消散的加速效果

最佳,中部土体次之,上部土体最小。可见透水管桩加速超静孔隙水压力消散的作用随土体深度的增加而增大。这是因为深度越深,土体超静孔隙水压力值越大,消散速率相对较快,使透水管桩单位时间排水量较大,所以透水管桩加速超静孔隙水压力消散效果明显。

3 结论

1)透水管桩阻碍了沉桩完成后桩周土超静孔隙水压力的上升,从超静孔隙水压力产生的角度出发,降低了桩周土超静孔隙水压力的峰值,控制了桩周土超静孔隙水压力的水平,有利于超静孔隙水压力后期的消散。在桩周土超静孔隙水压力消散前期,透水管桩的加速作用最明显;在桩周土超静孔隙水压力消散后期,透水管桩的加速作用慢慢衰退。

2)对于上部土体:群桩内、群桩边界和群桩外各测点超静孔隙水压力消散加速效果差别不明显;对于中部和下部土体:在群桩内及群桩边界,透水管桩加速超静孔隙水压力消散的作用较大,在群桩外,透水管桩加速超静孔隙水压力消散的作用稍小。

3)无论是群桩内部、群桩边界还是群桩外部,底部土体超静孔隙水压力消散的加速效果最佳,中部土体次之,上部土体最小。反映透水管桩加速超静孔隙水压力消散的作用随土体深度的增加而增大。

参考文献:

- [1]唐世栋,何连生,傅纵.土地基中单桩施工引起的超静孔隙水压力[J].岩土力学,2002(6):725-729.
[2]王育兴,孙钧.打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响[J].岩石力学与工程学报,2004,23(1):153

-158.

- [3]HUANG J H, LIANG N N, CHEN C H. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2001, 127(11): 939-949.
[4]CARTER J P, RANDOLPH M F, WROTH C P. Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of cylindrical cavity[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1979, 3(4): 305-322.
[5]ROY M. Behaviour of a sensitive clay during pile driving [J]. Canada Geotechnical Journal, 1981, 18(1): 67-85.
[6]张明义.静力压入桩的研究与应用[M].北京:中国建材工业出版社,2004.
[7]李向红,龚晓南.软粘土地基静力压桩的挤土效应及其防治措施[J].工业建筑,2000,30(7):11-14.
[8]罗战友.静压桩挤土效应及施工措施研究[D].杭州:浙江大学,2004.
[9]张立财.静压桩挤土效应及施工措施研究[D].广州:华南理工大学,2008.
[10]廖伟.邻近挤土桩工程施工对既有建筑物的影响及防治措施研究[D].广州:华南理工大学,2005.
[11]刘力英.邻近施工对既有建(构)筑物的影响及防治措施研究[D].广州:华南理工大学,2004.
[12]蒋建平,高广运.挤土桩施工的环境问题及其防治措施[J].施工技术,2004,33(1):9-11.
[13]周小鹏,梅国雄.透水桩技术及桩周土体固结效率有限元分析[J].南京工业大学学报:自然科学版,2014,36(3):101-105.
[14]周小鹏,梅国雄.考虑固结的透水管桩沉桩全过程有限元模拟[J].岩土力学,2014,35(Z2):676-682.
[15]徐建平,周健,许朝阳,等.沉桩挤土效应的模型试验研究[J].岩土力学,2000,21(3):235-238.

(责任编辑 李军)