

文章编号:1673-2049(2016)01-0090-09

透水性混凝土桩施工中超孔隙水压力变化特性试验

宋修广^{1,2}, 于一凡^{1,2}, 张宏博^{1,2}, 葛智^{1,2}

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:为研究透水性混凝土桩施工中产生的超孔隙水压力的变化规律,通过在现场埋设孔隙水压力计的方法,监测并分析了振动沉管法单桩施工过程中及施工后桩周土体的超孔隙水压力随时间、径向距离及深度的变化,并根据监测结果分析了透水性混凝土桩单桩施工对桩周地基的影响。结果表明:对于高地下水位的粉性土地基,桩周土体的超孔隙水压力在沉管结束时达到最大值,之后消散速率较快,完全消散时间较短,且距桩越近,超孔隙水压力的上升与消散速率越快;超孔隙水压力在径向上与深度上大致呈现递减趋势,距桩越近,超孔隙水压力越大;地基土体的液化范围与加固范围的空间分布呈上大下小的漏斗形。提出的适用于透水性混凝土桩的施工工艺可为类似工程的设计与施工提供参考。

关键词:基础工程;超孔隙水压力;现场试验;透水性混凝土桩;振动沉管;粉土

中图分类号:U411

文献标志码:A

Experiment on Variation Characteristics of Excess Pore Water Pressure During Pervious Concrete Pile Construction

SONG Xiu-guang^{1,2}, YU Yi-fan^{1,2}, ZHANG Hong-bo^{1,2}, GE Zhi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to reveal change regulation of excess pore water pressure during pervious concrete pile construction, excess pore water pressure of soil around the pile changing with time, radial distance and depth were monitored and analyzed during and after single pervious concrete pile construction by vibrating sinking pipe through the method of burying pore water pressure gauges in the field, and the effect of single pervious concrete pile construction on foundation around the pile was analyzed according to the monitoring results. The results show that excess pore water pressure of soil around the pile reaches maximum after sinking pipe and afterwards dissipates quickly for silt foundation with high groundwater level. The time of excess pore water pressure disappearing completely is very short. The rates of rise and decrease of excess pore water pressure are faster where it is closer to the pile. The excess pore pressure decreases approximately in radial direction and depth. The excess pore water pressure at same depth of each moment is larger where it is closer to the pile. The spatial distributions of liquefaction scope and reinforcement scope are about a funnel shape. The proposed construction technology suitable for

收稿日期:2015-08-13

基金项目:山东省科技发展计划项目(2011GGH21607);山东大学自主创新基金项目(2012TS060)

作者简介:宋修广(1966-),男,山东乳山人,教授,工学博士,博士后,Email: songxiuguang@sdu.edu.cn.

pervious concrete pile can provide reference for design and construction of similar engineering.

Key words: foundation engineering; excess pore water pressure; field test; pervious concrete pile; vibrating sinking pipe; silt

0 引 言

透水性混凝土是由特定级配的集料、水泥、外加剂、增强剂和水等按特定比例和工艺制成的多孔混凝土,与普通混凝土不同,透水性混凝土主要组成材料仅有少量的细骨料或者不含细骨料。由于该新型混凝土集强度与透水性于一体,在工业与民用建筑、路面工程及园林工程中得到推广应用,并取得了较好的效果。用透水性混凝土浇筑而成的透水性混凝土桩作为软基处理的措施正逐渐成为土木工程界的一种趋势,目前,各国学者在透水性混凝土及其桩体理论研究方面取得了重大突破,并针对强度-渗透性关系做了大量的试验,已有研究成果^[1-5]表明:透水性混凝土强度在 10~20 MPa 之间,透水系数一般介于 0.1~1.5 cm·s⁻¹之间;透水性混凝土桩桩体强度高,透水性强,兼具散体桩和刚性桩的优点,一方面在地基一定深度范围内,利用其自身强度提高浅层地基的承载力,减小软土地基的总沉降量;另一方面,形成竖向排水通道,缩短排水路径,有利于压缩层在施工期的排水固结,尽可能多地消除施工后沉降;此外透水性混凝土桩复合地基具有良好的抗震性能。

鉴于透水性混凝土桩独特的性能,由其形成的复合地基可作为桥头跳车的处治措施,对于地下水位高、地质条件差、建设工期短、质量要求高的道路工程十分适用。由于透水性混凝土桩产生较晚,目前关于该新型桩的施工方法及工艺尚不明确,为保

证桩体的透水性,在成桩过程中应尽量避免桩周土体或泥浆混入拌和料中堵塞孔隙,因此,振动沉管法成桩可满足上述要求,另外,该施工方法能使坍落度较低的透水性混凝土振动密实,保证桩身的强度。由于振动沉管施工会产生较大的超孔隙水压力^[6-9],影响桩体成桩质量及桩身承载力的发挥和施工进度,因此,为研究振动沉管法施工的可行性及其对周围环境的影响,在某高速公路开工前选择了试验段进行现场试验,监测并分析了单桩施工过程中地基不同位置处超孔隙水压力的产生与消散及纵向、横向的分布规律,并确定了振动沉管法施工的影响范围、加固范围及地基土体的液化范围,这对于透水性混凝土桩施工工艺、施工顺序及合理桩间距的确定具有重要的现实意义。

1 现场试验

1.1 试验段工程地质状况

试验段位于黄河冲积平原区,地下水位高,土层以粉土、粉质粘土为主,具有含水量高、孔隙比大、压缩性大、承载力低等特征。已有研究成果及工程实践表明,在该地区修筑高速公路存在路基沉降量大、桥头跳车严重等工程问题,因此可作为透水性混凝土桩的典型试验段。

根据地质勘探资料分析,将试验段所处区域的地基划分为 5 个工程地质层,具体如表 1 所示。

1.2 试验方案

表 2 为透水性混凝土设计配合比及性能指标。

表 1 试验段工程地质条件

Tab. 1 Engineering Geological Conditions of Test Field			
土层编号	土层名称	层底埋深/m	土层性质
1	素填土	0.0~1.3	黄褐色,稍湿,松散,以粉土为主,含少量植物根系
2	粉土	1.3~2.2	黄褐色,稍湿,稍密,土质均匀,摇振反应迅速,局部含粘粒
3	粉质粘土	2.20~6.45	黄褐色,可塑,切面光滑,粘性强,韧性强,干强度中等,局部粉土富集
4	粉土	6.45~10.60	黄褐色,湿,稍密,土质均匀,摇振反应迅速,局部粉砂质富集
5	粉质粘土	10.6~17.5	黄褐色一灰黑色,可塑,切面稍光滑,有光泽,粘性强,韧性强,干强度中等,局部夹粉土薄层

表 2 透水性混凝土设计配合比及性能指标

Tab. 2 Designed Mix Proportion and Performance Indexes of Pervious Concrete							
各材料用量/(kg · m ⁻³)					性能指标		
水泥	水	骨料	减水剂	化学添加剂	28 d 抗压强度/MPa	孔隙率/%	透水系数/(cm · s ⁻¹)
320	95	1 550	11.2	6.4	14.61	22.86	1.16

为保证透水性混凝土桩的强度与透水性,根据施工现场水位与土质条件进行室内试验,确定透水性混凝土的最优配合比,并在成桩后 28 d 取芯检验桩体质量,判定其是否达到设计要求。

选取长 40 m、宽 20 m 的试验段,使用振动沉管法制成透水性混凝土桩 9 根,桩径 0.5 m,桩距 5 m,矩形布置,有效桩长 8 m,选取其中成桩质量较好的 4 根做单桩承载力和复合地基承载力试验(该部分不属于本文研究内容),其平面布置如图 1 所示。成桩之前,使用钻孔机在距 9[#] 桩 1.5,3,6,9 m 位置埋设孔隙水压力计(简称孔压计),竖向等间距布置,其竖向布置如图 2 所示,4 m 与 6 m 深处的孔压计位于粉质粘土层,8 m 与 10 m 深处的孔压计位于粉土层,每个孔压计的上、下方各布置 0.5 m 厚的砂层,相邻 2 层孔压计间填入干的膨润土球以阻断孔压沿人工钻孔发生消散(图 3)。

试验所用振动锤为小型中频 DZ-60 型号,质量 5 000 kg,激振力 0~492 kN,最大拔桩力 215 kN。振动沉管施工时地下水位 2.3 m。为避免其他桩体对孔压的影响,先进行 9[#] 桩的施工,沉管时间 8 min,填料时间 5 min,因透水性混凝土可在水下成

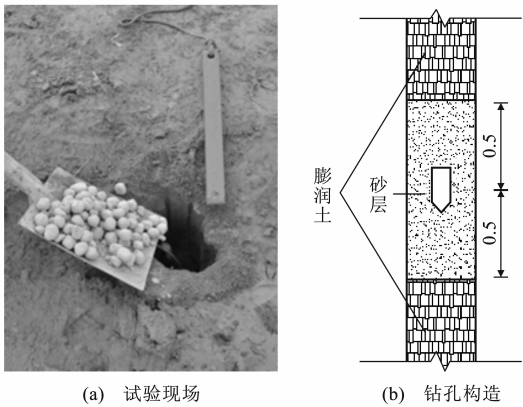


图 3 钻孔内填入膨润土球(单位:m)

Fig. 3 Bentonite Ball Filled in Drilled Hole (Unit:m)

桩,故填料之后即进行拔管,拔管时间 5 min。

试验选用振弦式孔隙水压力计,并使用与其配套振弦式读数仪监测频率。振动沉管施工过程中,孔压计频率不稳定,但从读数仪中可以看出频率呈整体下降趋势,因此,分别在沉管结束、拔管结束、拔管后每隔 15 min 时记录孔压计的频率。

1.3 数据处理

施工过程中产生的超孔隙水压力为

u = k(f_0^2 - f_i^2) (1)

式中:u 为某时刻的超孔隙水压力;k 为孔压计频率换算系数;f_0 为施工前孔压计埋入相应位置在静水压力作用下的钢弦自振频率;f_i 为施工中及施工后各时刻 i 时的钢弦自振频率。

2 施工过程中超孔隙水压力变化规律分析

振动沉管过程中,钢套筒将桩位处的土体排开,使桩周土体受到严重的扰动,改变了土体的初始应力状态,对于灵敏度较高的饱和粉土,在振动与挤压作用下,其结构将发生破坏,强度降低,并产生较高的超孔隙水压力。超孔隙水压力的存在将影响周围地质环境及透水性混凝土桩的连续施工,下面将对超孔隙水压力的消散时间及纵向、横向的分布规律进行分析。

2.1 超孔隙水压力的时程变化

图 4 为各位置处超孔隙水压力随时间的变化。由图 4 可以看出,沉管结束后,各位置处超孔隙水压力达到最大值,沉管完成后至拔管后 15 min 内超孔隙水压力迅速减小,消散率在 90% 以上,之后孔压变化不明显,除 1[#] 孔 4 m 深处的测点外,其余各测点超孔隙水压力在拔管后 15 min 内基本完全消散,

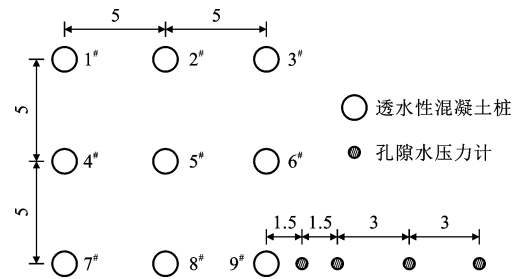


图 1 现场试验平面布置(单位:m)

Fig. 1 Plan Layout of Field Tests (Unit:m)

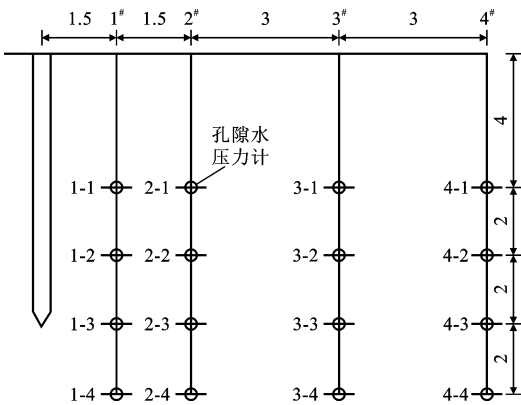


图 2 孔隙水压力计竖向布置(单位:m)

Fig. 2 Vertical Layout of Pore Water Pressure Gauges (Unit:m)

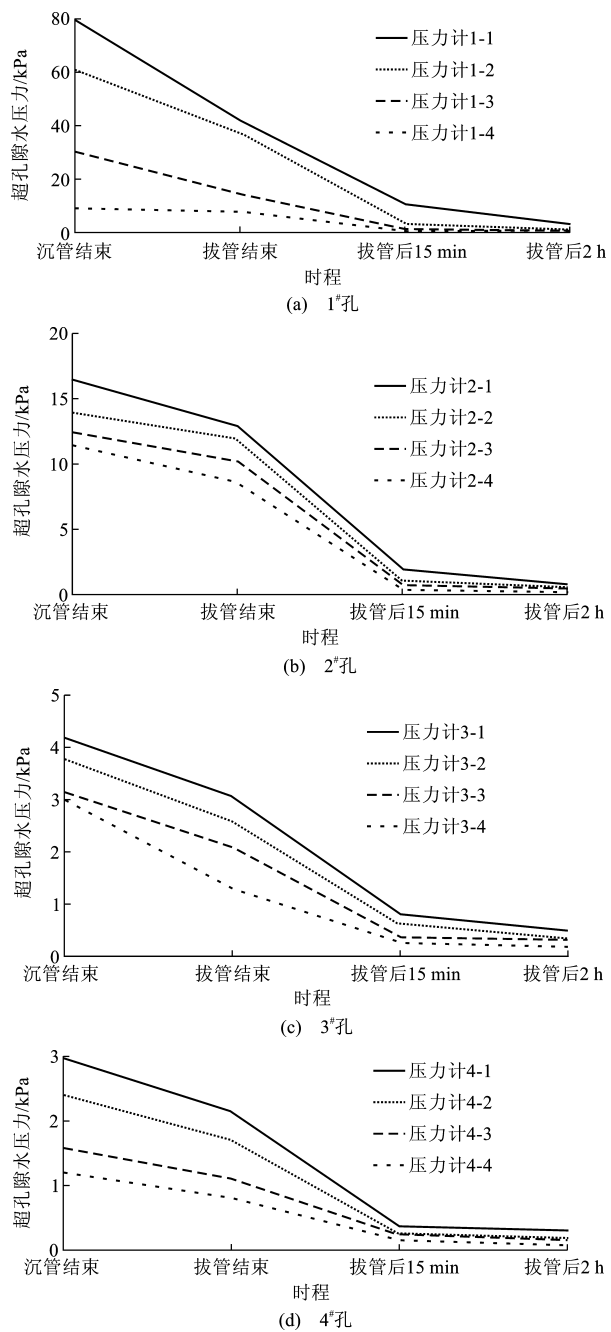


图 4 各位置处超孔隙水压力随时间的变化

Fig. 4 Changes of Excess Pore Water Pressures with Time at Different Locations

这为振动沉管的连续施工提供了可能。由于试验场地地基土体基本为粉性土,孔隙比大,透水性强,其本身就是良好的排水通道,且拔管过程中钢套筒将桩周部分淤泥带出,加上振动的联合作用,使桩体与周围土体之间产生较大的空隙,同时透水性混凝土桩桩体形成的竖向排水通道以及地基土体的水裂作用,都大大缩短了超孔隙水压力的消散路径,故各测点处超孔隙水压力消散速率较快。表 3 为各孔 6 m

表 3 各孔 6 m 深处超孔隙水压力变化速率				
Tab. 3 Change Rates of Excess Pore Water Pressure at Depth of 6 m				
径向距离/m	超孔隙水压力变化速率/(kPa·min ⁻¹)			
	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
1.5	7.60	-2.33	-2.30	-0.020
3.0	1.75	-0.21	-0.73	-0.004
6.0	0.48	-0.12	-0.14	-0.002
9.0	0.30	-0.07	-0.10	-0.004

注:第 1 阶段指初始至沉管结束;第 2 阶段指沉管结束至拔管结束;第 3 阶段指拔管结束至拔管结束后 15 min;第 4 阶段指拔管结束后 15 min 至拔管结束后 2 h;正值为上升,负值为下降,下同。

深处超孔隙水压力变化速率。从表 3 可以看出,距桩越近,超孔隙水压力的上升与消散速率越快。

距桩最近的 1# 孔最大超孔隙水压力出现在 4 m 深处,最大值可达 80 kPa,各测点消散时间基本相当,但 1# 孔 4 m 深处超孔隙水压力消散较慢,这与其产生的超孔隙水压力值较大且该位置处孔压计位于粉质粘土层有关。由于工程上超孔隙水压力值低于 5 kPa 即可忽略^[10],故可认为拔管后 2 h 各测点超孔隙水压力消散完全。

2.2 超孔隙水压力的径向变化

图 5 为成桩的不同时刻超孔隙水压力的径向变化规律,其中, h 为深度。从图 5 可以看出,各个时刻不同深度处超孔隙水压力在径向上大致呈现递减趋势,对桩周 3 m (即 $6d$, d 为桩径) 范围内影响较大。产生上述现象的原因在于沉管的挤土效应首先表现在桩周附近区域,由于土体的阻尼作用,振动能量的传递在径向上逐渐衰减,表现为超孔隙水压力沿径向递减,从超孔隙水压力的径向变化规律中可以看出桩周土体径向受扰动的程度。

沉管结束与拔管结束、拔管后 15 min 与拔管后 2 h 的超孔隙水压力径向变化规律基本相同,沉管后 4, 6, 8 m 深处超孔隙水压力的最大值均发生在距桩最近的 1.5 m 处,而 10 m 深处的超孔隙水压力最大值出现在距桩 3 m 位置处,这可能与 1-4 号孔压计埋置偏下有关。距桩 1.5 m 深 6 m 处的超孔隙水压力在拔管后 15 min 内的消散速率较其他位置偏快,这与该位置靠近下部粉土层有关,膨润土未能阻断其与粉土层的联系,使该位置与粉土层之间发生渗流,导致超孔隙水压力迅速消散。

当钢套筒拔出后,透水性混凝土桩即发挥透水作用,其多孔的结构将加速超孔隙水压力的消散,这从超孔隙水压力的径向消散速率中可以明显看出。

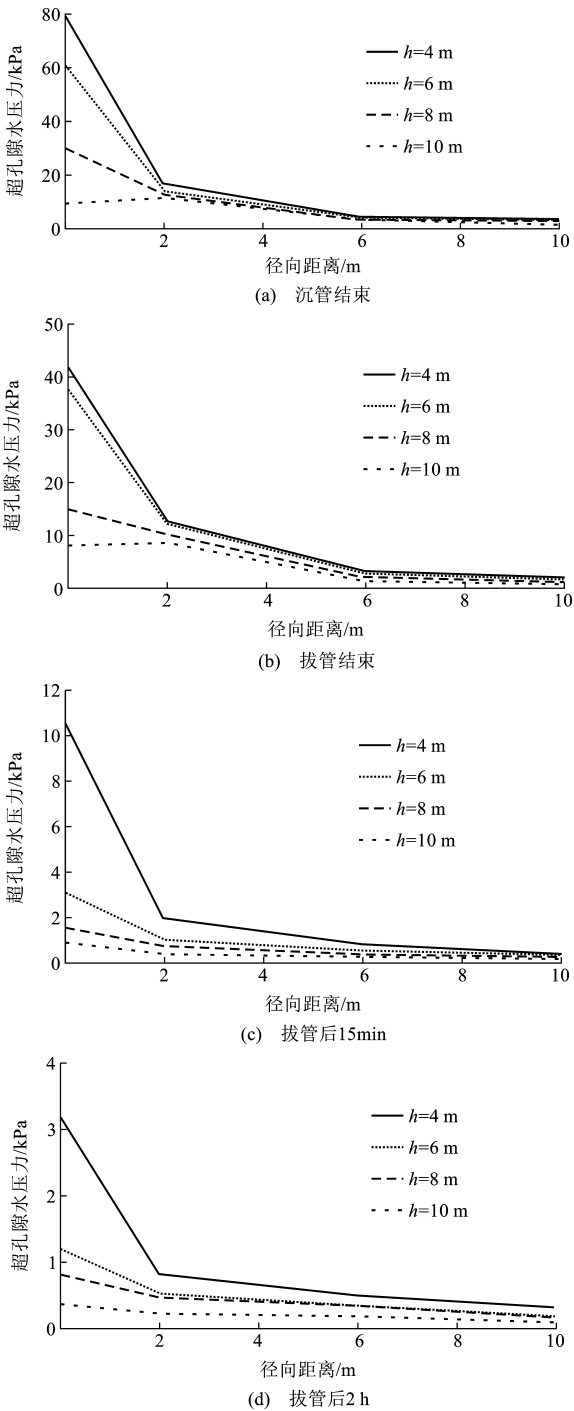


图 5 不同时刻超孔隙水压力的径向变化
Fig. 5 Radial Changes of Excess Pore Water Pressures at Different Time

透水性混凝土桩的排水作用主要体现在路基上土阶段,其可以加速上土过程中超孔隙水压力的消散,维持地基与路基的稳定。

2.3 超孔隙水压力的深度变化

图 6 为成桩的不同时刻超孔隙水压力沿深度方向的变化规律(x 为径向距离),从图 6 可以看出,各时刻超孔隙水压力沿深度方向大致呈递减趋势,且

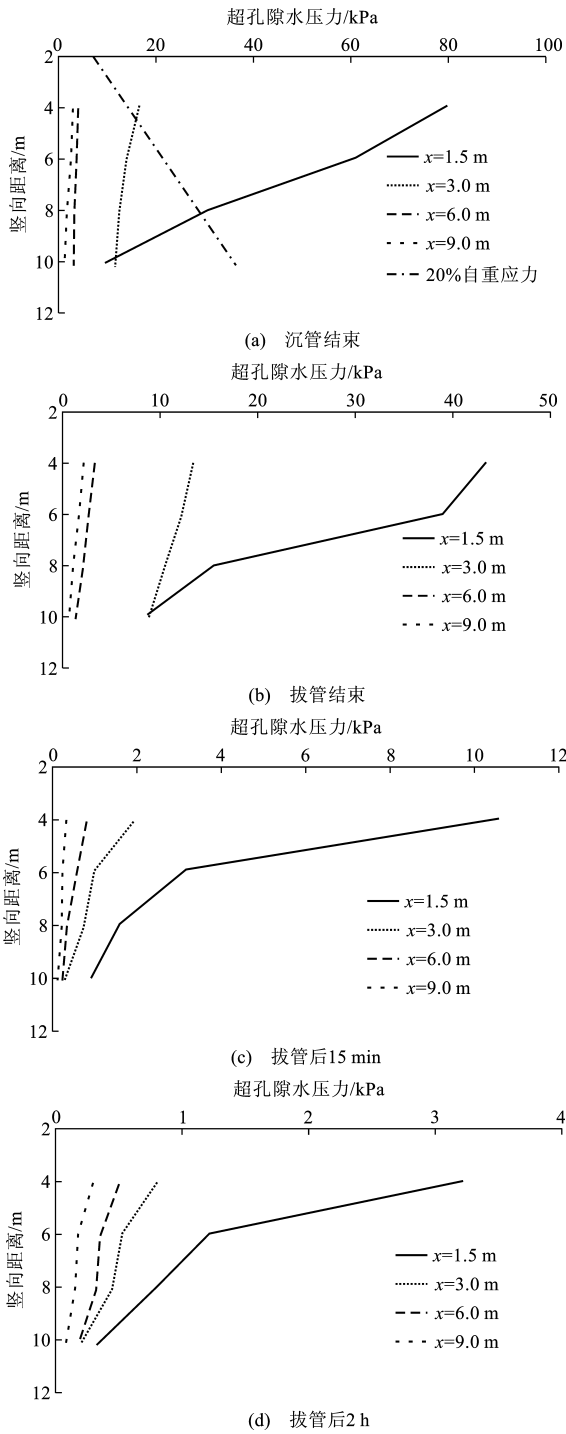


图 6 不同时刻超孔隙水压力的深度变化
Fig. 6 Depth Changes of Excess Pore Water Pressure at Different Time

最大值均出现在深度 4~6 m 处,而在桩端以下,超孔隙水压力随深度增加而迅速减小。由于在振动沉管施工过程中,地基上部土体受挤压与振动扰动的

时间最长,而对下部土体的影响时间相对较短,桩端以下土体受扰动最小,因此出现上述规律。

较小,距桩 6 m 以外 10 m 深处的超孔隙水压力接近为 0。从图 6 还可以看出,距桩越近,各时刻对应深度处的超孔隙水压力越大。

表 4 为 1# 孔各深度处超孔隙水压力变化速率。由表 4 可以看出:由于透水性混凝土桩桩体的竖向排水作用,地基深度越浅处,排水路径越短,排水阻力也越小,故其超孔隙水压力的消散速率越快,这表明透水性混凝土桩对于加速路基施工期浅层地基的固结排水具有积极且显著的作用。

表 4 1# 孔各深度处超孔隙水压力变化速率
Tab. 4 Change Rates of Excess Pore Water Pressure of 1# Hole at Different Depths

竖向距离/m	超孔隙水压力变化速率/(kPa·min ⁻¹)			
	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
4	9.93	−3.75	−2.08	−0.070
6	7.60	−2.33	−2.30	−0.020
8	3.81	−1.55	−0.89	−0.007
10	1.19	−0.15	−0.47	−0.005

试验段地基 2.2~6.45 m 深度范围内的土体为次固结粉质粘土,灵敏度较高,具有触变性和流变性,在附加应力(超孔隙水压力与沉管的挤压)作用下,其强度极易降低,使得桩周土体失去抵抗变形的能力,尤其对于灵敏度更高的粘土层,施工时产生的超孔隙水压力变大,其强度降低更加严重,且不易恢复,这将严重影响桩基承载力的发挥,甚至会出现掉桩现象,置换率越高,地基承载力反而可能越低。因此,应控制沉管与施工速度,力求减小对地基土体的扰动。

3 透水性混凝土桩施工过程影响分析

3.1 地基土体液化范围分析

振动沉管法施工过程中,钢套筒周围土体被挤开,可以看作是圆孔扩张过程^[11-14]。圆孔扩张理论包括球形孔扩张问题和柱形孔扩张问题,振动沉管法属于柱形孔扩张问题。土体具有触变性,振动^[15-17]与挤压使饱和粉土体产生了较高的超孔隙水压力,导致土颗粒间的接触面积减小,孔隙被水取代,使得钢套筒周围一定范围内土体液化,进入流塑或可塑状态(图 7),淤泥沿管壁外侧涌出地面(图 8),桩周土体强度减小,随着时间的推移,超孔隙水压力逐渐消散,土体强度逐渐恢复,最终强度甚至超过初始强度。

当土体发生液化时,其有效应力 σ' 为 0,即总应

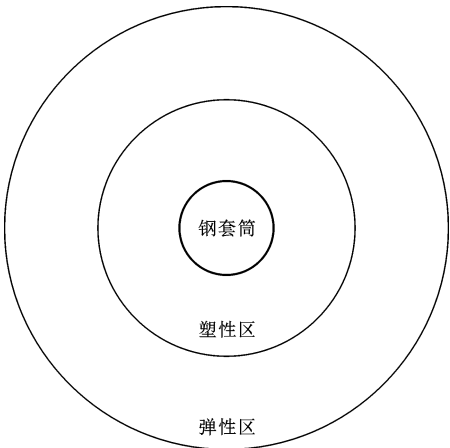


图 7 振动沉管挤土效应
Fig. 7 Soil Squeezing Effect of Vibrating Sinking Pipe



图 8 淤泥沿管壁外侧涌出地面
Fig. 8 Sludge Poured Out of Ground Along Outside of Pipe

力 σ 全部由孔隙水压力 u 承担,用公式表示为

$$\sigma' = \sigma - u = 0 \tag{2}$$

地基某位置处的总孔隙水压力为施工中产生的超孔隙水压力与静水压力之和,沉管后总孔隙水压力的竖向分布如图 9 所示。

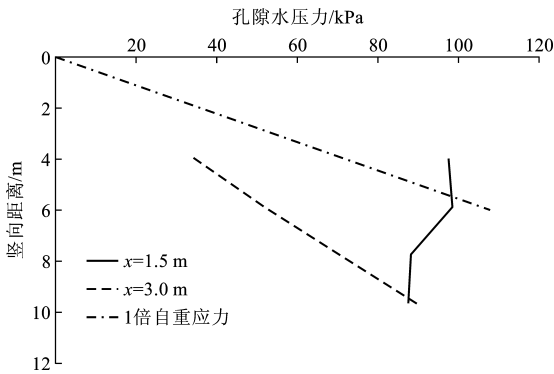


图 9 沉管后总孔隙水压力的竖向分布
Fig. 9 Vertical Distribution of Total Pore Water Pressure After Sinking Pipe

从图 9 可以看出,距桩 1.5 m 深 4 m 处的地基土体已液化,而距桩 3 m 处的地基尚未液化,则深 4 m 处的地基土体液化范围半径大于 1.5 m ($3d$) 小于 3 m ($6d$)。由于沿深度方向总孔隙水压力与 1 倍自重应力的差值越来越大,说明地基越深处,土体的液化范围半径越小,液化范围的空间分布呈上大下小的漏斗形。因施工时地下水位为 2.3 m,而 2.3~4 m 之间未埋设孔压计,故该深度区间上的地基液化范围尚不确定。

3.2 振动沉管加固与影响范围分析

为得到振动沉管法的加固范围,根据有效加固深度的判别标准^[18],将附加应力(此处即为超孔隙水压力)为自重应力的 20% 时作为有效加固深度的临界值。当沉管结束时,桩周超静孔压达到最大值,即附加应力最大,故根据图 6(a)绘制振动沉管加固范围,如图 10 所示,20% 自重应力线与超孔隙水压力线的交点即为加固范围的临界点,2 m 与 10 m 深处超孔隙水压力是根据超孔隙水压力趋势线得到的估计值。

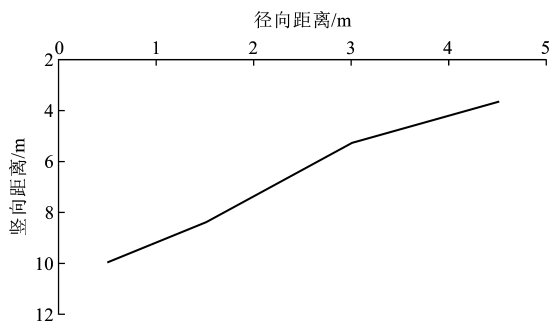


图 10 振动沉管法加固范围

Fig. 10 Reinforcement Range of Vibrating Sinking Pipe

从图 10 可以看出,振动沉管法施工对桩周一定范围内的上部土体加固效果明显。对于桩长 8 m,桩径 0.5 m,地基土为粉土时,振动沉管最大径向加固范围约为 4.5 m 且随深度逐渐减小,呈上大下小的漏斗形,竖向加固范围约为 10 m。

参照图 5(a),根据一般经验以超孔隙水压力大于 2 kPa 作为影响范围的控制标准^[19],深度 4 m 以下地基在距桩 9 m 位置处的超孔隙水压力为 2.8 kPa,根据其径向变化趋势,超孔隙水压力为 2 kPa 的位置距桩约 10 m 处,沿深度方向 10 m 范围内基本相同。

3.3 施工过程应注意的问题

为保证透水性混凝土的孔隙率,其组成材料中仅含有少量的细集料或不含细集料,粗骨料主要靠水泥水化和硬化胶结在一起,因此,透水性混凝土的

坍落度较低,填料时不能采用泵送,目前只能采用人工与机械相结合的填料方式;为保证成桩质量,避免断桩与缩颈等工程问题发生,振动拔管速度应尽量降低,但较低的拔管速度又会引起其他问题的出现。由于透水性混凝土受振动易离析,使得水泥浆向桩体下部移动,降低了桩体下部的孔隙率,甚至导致堵孔,影响桩体的透水效果,同时还会造成上部桩体因胶结力不足,从而导致桩基的强度与承载力达不到设计要求,影响工程质量。因此,应合理控制振动拔管速度,根据工程经验,建议拔管速度控制在 $1.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内。

3.4 桩基承载力时效性的讨论

透水性混凝土桩属于摩擦桩,桩基承载力的发挥主要靠桩体与桩周土体的摩擦来实现。振动沉管施工过程中对桩周土体产生了较大的扰动,土体强度降低^[20-22],并产生了较高的超孔隙水压力,这大大影响了桩基承载力的发挥,随着时间的增加,土体开始触变恢复,强度不断提高,超孔隙水压力也逐渐消散,根据有效应力原理,桩周土体有效应力逐渐增加,桩基承载力不断提高。大量工程实例表明,在超孔隙水压力完全消散后,桩基承载力仍在提高^[23-25],因此桩基承载力的时效性是一个值得研究的问题。

由于透水性混凝土桩振动沉管法施工过程中,地基上部土体产生了较大的超孔隙水压力,因此,在超孔隙水压力消散后,桩体上部的摩阻力将得到较大提高,但桩基承载力达到稳定的时间尚不确定。根据成桩 3 个月后的单桩及复合地基静载试验得知,透水性混凝土桩的单桩承载力为 240 kN,复合地基承载力为 210 kPa。

4 结 语

(1) 由于沉管的振动与挤压,使得沉管后桩周土体超孔隙水压力达到最大值,在粉土的强透水性、透水性混凝土桩形成的竖向排水通道以及地基土体的水裂作用等综合影响下,桩周土体的超静孔压在拔管后 2 h 基本消散完全,且距桩越近,超孔隙水压力的上升与消散速率越快。

(2) 对于粉性土地基上透水性混凝土桩施工过程中及施工后的各个时刻,桩周土体的超孔隙水压力在径向上及深度上大致呈现递减趋势,且距桩越近,各时刻对应深度处的超孔隙水压力越大。土体灵敏度越高,产生的超孔隙水压力越大,其强度降低越严重。

(3)对于粉性土地基,高地下水位为施工过程中土体液化提供了物质条件,沉管的振动与挤压为土体液化提供了动力,且沉管的挤压作用对桩周一定范围内的上部土体加固效果明显,液化范围与加固范围的空间分布均呈上大下小的漏斗形;振动沉管施工的径向影响范围较大;施工过程中产生的超孔隙水压力及土体液化对桩基承载力的时效性有较大影响,承载力稳定时间尚不确定。

(4)振动沉管使桩周土体产生较大的超孔隙水压力,若设计桩间距较小,连续施工时会造成邻桩超孔隙水压力的累积,导致尚未初凝的透水性混凝土离析和孔隙堵塞,并影响成桩质量,建议采用隔排隔桩“跳打”或延长沉管时间间隔的施工方法;建议振动拔管速度控制在 $1.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内。

参考文献:

References:

- [1] 崔新壮,王 聪,周亚旭,等.透水性混凝土桩减压减震耦合抗震机理研究[J].山东大学学报:工学版,2012,42(4):86-91.
CUI Xin-zhuang, WANG Cong, ZHOU Ya-xu, et al. Anti-earthquake Mechanism of Pervious Concrete Pile Composite Foundation[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(4): 86-91.
- [2] 张 娜,崔新壮,张 炯,等.路堤荷载作用下透水性混凝土桩减压沉降效应研究[J].山东大学学报:工学版,2013,43(4):80-86.
ZHANG Na, CUI Xin-zhuang, ZHANG Jiong, et al. Settlement-controlling and Pressure-reduction Effect of Pervious Concrete Pile Under the Action of Embankment Load[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2013, 43(4): 80-86.
- [3] 崔新壮,欧金秋,张 娜,等.透水性混凝土强度-渗透性模型试验研究[J].土木建筑与环境工程,2013,35(4):114-120.
CUI Xin-zhuang, OU Jin-qiu, ZHANG Na, et al. Strength-permeability Model of Pervious Cement Concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 114-120.
- [4] MONTES F, HASELBACH L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete[J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(6): 960-969.
- [5] LUCK J D, WORKMAN S R, HIGGINS S F, et al. Hydrologic Properties of Pervious Concrete [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1807-1813.
- [6] 吉同元,胡银宝,刘松玉,等.软土地基中CFG桩单桩施工引起的超静孔隙水压力[J].公路交通科技, 2006, 23(8): 53-56.
- [7] 邓俊杰,陈龙珠,刑爱国,等.液压高频振动沉桩的饱和土超静孔压及单桩静载特性试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(2):203-208.
DENG Jun-jie, CHEN Long-zhu, XING Ai-guo, et al. Experimental Studies on Pore Pressure of Saturated Soils and Bearing Capacity of Piles Driven by High-frequency Hydraulic Vibrator[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 203-208.
- [8] 周荣官.粉砂地基中振动沉管灌注桩的几个问题[J].水利水运工程学报,2004(1):74-77.
ZHOU Rong-guan. Some Problems of Vibro Casing Cast-in-place Pile in Silty Sand Foundation [J]. Hydro-science and Engineering, 2004(1): 74-77.
- [9] 孙瑞民,杨凤灵,邓小涛. CFG桩施工过程中孔隙水压力试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(11):1792-1798.
SUN Rui-min, YANG Feng-ling, DENG Xiao-tao. Experimental Study on Pore Water Pressure in Construction of CFG Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1792-1798.
- [10] 唐世栋,何连生,傅 纵.软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J].岩土力学,2002,23(6):725-727, 732.
TANG Shi-dong, HE Lian-sheng, FU Zong. Excess Pore Water Pressure Caused by an Installing Pile in Soft Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-727, 732.
- [11] 肖昭然,张 昭,杜明芳.饱和土体小孔扩张问题的弹塑性解析解[J].岩土力学,2004,25(9):1373-1378.
XIAO Zhao-ran, ZHANG Zhao, DU Ming-fang. An Elastoplastic Closed-form Approach of Cavity Expansion in Saturated Soil Based on Modified Cam Clay Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1373-1378.
- [12] 陈昌富,李其泽.基于圆孔扩张理论顶部加箍碎石桩承载力计算[J].湖南大学学报:自然科学版,2011,38(10):7-12.
CHEN Chang-fu, LI Qi-ze. Calculation of Bearing Capacity of Geosynthetic-encased Gravel Pile Based on Cavity Expansion Theory[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(10): 7-12.
- [13] 陈昌富,吴梦婷.基于滑块平衡法顶部加箍碎石桩承

- 承载力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1253-1260.
- CHEN Chang-fu, WU Meng-ting. Computational Method for Bearing Capacity of Upper Geosynthetic-encased Stone Columns Based on Block Limit Equilibrium Method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1253-1260.
- [14] 卢文晓. 静压桩与土的相互作用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2004.
- LU Wen-xiao. Study on Interaction Between Static Pressure Pile and Soil[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004
- [15] 贺 军, 伍家超. 振动沉管 CFG 桩施工对旧路的扰动影响[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(18): 4534-4537.
- HE Jun, WU Jia-chao. The CFG Pile Construction of Vibration Diving Casting Disturbing Effect on the Old Road[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(18): 4534-4537.
- [16] HUNT C E. Effect of Pile Installation on Static and Dynamic Soil Properties[D]. Berkeley: University of California, 2000.
- [17] 张建民, 王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 89-97.
- ZHANG Jian-min, WANG Wen-xiang. Effect of Vibration Frequencies on Dynamic Behavior of Saturated Sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 89-97.
- [18] 吴雪婷, 徐光黎. 软土地基沉降计算中压缩层厚度控制标准分析[J]. 人民长江, 2009, 40(5): 49-51.
- WU Xue-ting, XU Guang-li. Analysis of Control Standard of Compressed Layer Thickness in Calculating Soft Soil Foundation Settlement[J]. Yangtze River, 2009, 40(5): 49-51.
- [19] 赵秀绍, 莫林利, 孙瑞民, 等. CFG 桩施工引起孔隙水压力变化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 1): 102-107.
- ZHAO Xiu-shao, MO Lin-li, SUN Rui-min, et al. Experimental Study of Pore Water Pressure Variation Properties During CFG Pile Construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 102-107.
- [20] 刘子振, 言志信, 凌松耀, 等. 非饱和土边坡抗剪强度的力学参数影响及灵敏度分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4508-4513.
- LIU Zi-zhen, YAN Zhi-xin, LING Song-yao, et al. Sensitivity Analysis and Influence of Mechanical Parameters on Shear Strength of Unsaturated Soil Slope [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(11): 4508-4513.
- [21] 柳申周. 高灵敏度软土液化地基工程处理措施[J]. 山西水利科技, 2013(4): 47-48, 59.
- LIU Shen-zhou. The Measures to Treat the Buildings' Foundations on High Sensitive Soft Soil and Liquefaction Soil[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2013(4): 47-48, 59.
- [22] 樊向阳, 顾国荣, 黄宏伟. 上海地区土体灵敏度的研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(3): 130-132.
- FAN Xiang-yang, GU Guo-rong, HUANG Hong-wei. Study on Soil Sensitivity in Shanghai Region [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(3): 130-132.
- [23] 鲁燕儿. 混凝土管桩沉桩机理和承载力计算方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- LU Yan-er. Study on Installation Mechanism and Calculation Method for Bearing Capacity of Concrete Pipe Pile[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [24] RAMESH C G. Discussion of "Soil Deformation and excess Pore Pressure Field Around an End-closed Pile" by Juan M. Pestana, Christopher E. Hunt, and Jonathan D. Bray [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(7): 669-671.
- [25] CHEN Y H, QI C G, XU H Y, et al. Field Test Research on Embankment Supported by Plastic Tube Cast-in-place Concrete Piles[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(4): 1359-1368.