DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.003
唐彤芝, 明经平, 关云飞, 等. 混凝土芯砂石桩振动沉管成桩效应及其累积特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 18-27. (TANG Tongzhi, MING Jingping, GUAN Yunfei, et al. Study on compaction effect and its accumulation characteristics of concrete-core sand-gravel pile with vibrating immersed tube technology[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 18-27. (in Chinese))

混凝土芯砂石桩振动沉管成桩效应及其累积特性研究

唐彤芝, 明经平, 关云飞, 赵维炳
(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 混凝土芯砂石桩是由高强度预制混凝土芯桩和透水的砂石外壳组合而成, 常采用振动沉管施工工艺进行软土地基加固。针对混凝土芯砂石桩新颖的桩型特点, 对软黏土地基中振动沉管工艺引起的成桩效应及其特性进行了现场测试分析和理论计算研究。通过对远距离四桩施工全过程、全场地持续施工过程进行孔压、周边土体深层水平位移和混凝土芯桩桩身应力的实时跟踪监测, 得到各监测量的变化规律和特点, 揭示了振动沉管持续施工对各监测量消长变化的累积特性, 指出振动沉管施工过程综合了静、动荷载对地基土的共同作用, 体现荷载传递引起的能量在时间和空间上持续累积的特点。运用圆孔扩张理论对混凝土芯砂石桩沉管挤土的超静孔压和径向位移进行计算, 探讨了理论解答与实际情况的适应性。

关　键　词: 混凝土芯砂石桩; 振动沉管; 成桩效应; 累积特性; 圆孔扩张理论
中图分类号: TU472　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-640X(2019)01-0018-10

混凝土芯砂石桩是国内学者提出的由内置小直径预制混凝土桩和砂石外壳联合构成的一种新型组合桩[1-2], 一般采用振动沉管施工, 一次性成桩, 可以同时发挥预制混凝土桩的高强度竖向承载能力和砂石外壳的排水固结作用。与上部设置的褥垫层形成复合地基, 对深厚软基进行加固处理以达到提高地基承载力、稳定性和控制工后沉降的目的, 已经在高速公路和水利堤防工程中得到了成功应用和初步推广[3-5], 近年来相关的理论研究和应用得到逐步深入的发展[6-9]。

在软黏土或黏性土地基中采用带桩靴或预制桩尖的振动沉管施工, 会对土体产生包括超静孔压、振动、侧向挤压及结构扰动与破坏在内的一系列效应, 可笼统地称之为“成桩效应”, 振动沉管过程是动荷载和静荷载作用的传递和能量的消长累积过程, 对地基土结构和强度会造成扰动和破坏, 严重时影响成桩质量和地基安全。国内外对静压预制桩引起的挤土效应研究较多。振动沉管的成桩过程涉及时间、空间、桩土相互作用以及动静荷载与能量的传递等, 其效应十分复杂, 现有研究尚未能十分清晰地揭示其对周围环境的作用机理, 与静压桩相比研究较少, 主要集中于工程现场测试、室内试验和圆孔扩张法、应变路径法和有限元数值模拟法等[8, 10]。

混凝土芯砂石桩是一种不同于预制管桩或 CFG 桩的新桩型, 沉管过程大体相同, 但桩型结构、灌料、拔管等有所差异, 因此其成桩效应也另有特点。目前相关的研究很少, 鲁绪文等[8]运用圆孔扩张和固结理论分析了混凝土芯砂石桩的挤土性状, 指出成桩后挤土产生的超孔隙水压力消散远快于 CFG 桩。叶观宝等[6]采用 ABAQUS 有限元并结合圆孔扩张和砂井固结理论对单桩沉桩过程进行了模拟计算分析, 表明砂石桩的存在大大加快了地基土中超孔隙水压力的消散和桩周土强度的恢复。

目前研究成桩效应主要为近距离的单桩测试, 以一根试桩为中心, 在试桩周围近距离预先布设孔压计、

收稿日期: 2018-05-09
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51208321); 江苏省交通科学研究计划项目(05y18)
作者简介: 唐彤芝(1974—), 男, 湖南东安人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事软弱土地基改良与处治技术研究。
E-mail: tztang@nhri.cn

沉降标或测斜管等,对打桩结束后一段时间进行监测。而对较远距离多桩施工、全场地施工以及可能存在的孔压、应力、位移等的累积叠加特性的研究尚未多见。针对混凝土芯砂石桩,细化到覆盖施工准备-沉管-停管灌料-拔管补料的全过程的孔压监测甚少,难以准确掌握施工全过程孔压的增长、消散规律以及可能存在的累积叠加特性。本文综合整理分析混凝土芯砂石桩振动沉管施工时的现场测试数据,结合圆孔扩张理论对成桩效应及其累积叠加特性进行了研究和探讨。

1　工程简介与测试方案

1.1　工程简介

江苏省某高速公路桥头场地为河流漫滩冲积形成,地势平坦,平面布置见图 1,沿路堤中心轴线的土层剖面分布见图 2,土体主要物理力学性质指标见表 1。该桥头路段长约 41 m,路基设计宽度 35 m,路堤边坡坡率 1∶2,路堤填土高度达到 6 ~ 8 m,为高填土路段,设计软基处理深度达到 22 ~ 26 m,采用混凝土芯砂石桩振动沉管法施工,桩径 50 cm(其中预制混凝土芯桩边长 20 cm),正三角形布置,桩间距分别为 1.9 m(靠近桥头 20 m)和 2.1 m。施工工序:放样与桩机就位→振动沉管→吊、接桩→灌中粗砂或碎石屑→振动拔管→砂或碎石封顶→移机。打桩完毕后铺设 50 cm 厚的碎石垫层和一层土工格栅(双向抗拉强度大于 30 kN/m)作为褥垫层构成复合地基。

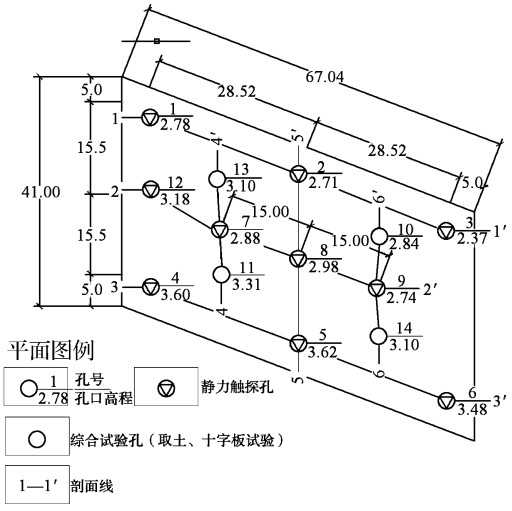


图 1　场地及勘探点平面布置(单位:m)

Fig. 1　Site and exploration points layout plan (unit: m)

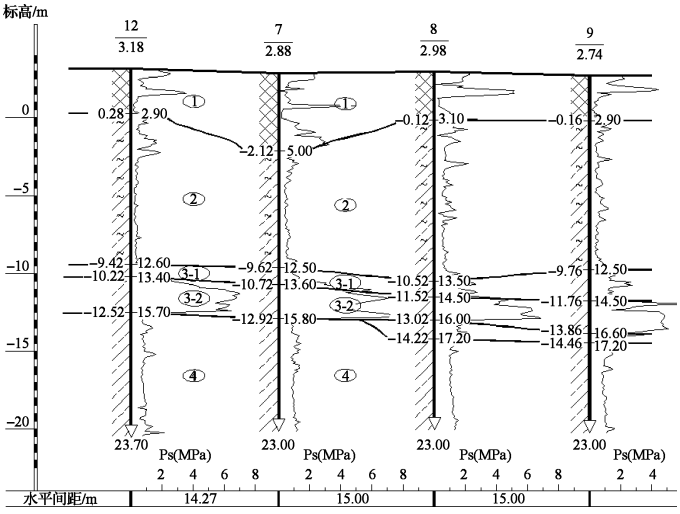


图 2　路堤中心轴线土层剖面分布

Fig. 2　Section of soil layer of embankment center axis

表 1　地基土体主要物理力学性质指标统计

Tab. 1　Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	土层名称	层厚/m	ω/%	γ/(kN·m^{-3})	e_0	I_p	I_L	$a_{(1-2)}$/MPa^{-1}	$E_{s(1-2)}$/MPa	直剪(快剪) c/kPa	直剪(快剪) φ/°	f_{ak}/kPa
①	杂填土	2.0 ~ 5.0										
②	淤泥质粉质黏土	6.6 ~ 10.9	37.9	18.0	1.044	11.6	1.30	0.47	4.87	7.0	23.7	65
③-1	粉质黏土夹粉土	0.6 ~ 2.5	35.2	18.3	0.963	11.6	1.27	0.45	5.37	18.0	16.5	105
③-2	粉土夹粉质黏土	0.7 ~ 2.9	33.9	18.5	0.934	10.9	1.35	0.41	5.68	10.0	25.5	150
③-3	粉质黏土夹粉土	0.6 ~ 2.5	26.6	19.3	0.752	11.7	0.76	0.45	3.94	25.0	13.7	165
④	粉质黏土	9.6 ~ 10.1	35.0	18.7	0.927	13.0	1.16	0.43	5.29	13.0	12.2	105

1.2 成桩效应现场测试方案

1.2.1 远距离单桩施工引起的孔压全过程监测 如图 3,在场地中心区域选择 4 个相互紧邻桩位点的中心处采用“单孔单只”方法埋设 4 只孔压计(深度分别为 -3.5, -7.0, -11.0 和 -18.0 m),在距离孔压计埋设位置较远处不同距离(9.6,6.3,11.7 和 11.7 m)分别进行单桩打桩作业,在“沉管-下桩、灌料-拔管”的全过程对孔压测值进行实时跟踪监测,分析成桩过程的孔压变化及增量累积效应。

1.2.2 连续成桩的场地外地基土侧向水平位移监测 如图 4,在距离场地边界最外一排桩位 3 m 处埋设 1 根测斜管(深度 25 m),监测连续打桩期间地基土深层水平位移变化规律,分析远距离连续成桩产生的侧向挤压累积效应,评价沉管施工对周围环境的影响。

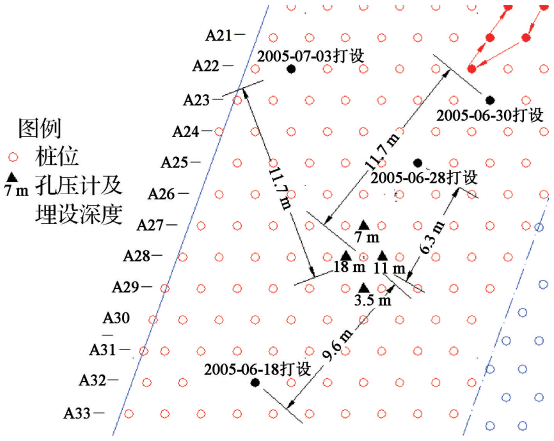


图 3 远距离单桩施工的孔压监测布置

Fig. 3 Monitoring layout of pore pressure in long distance single pile construction

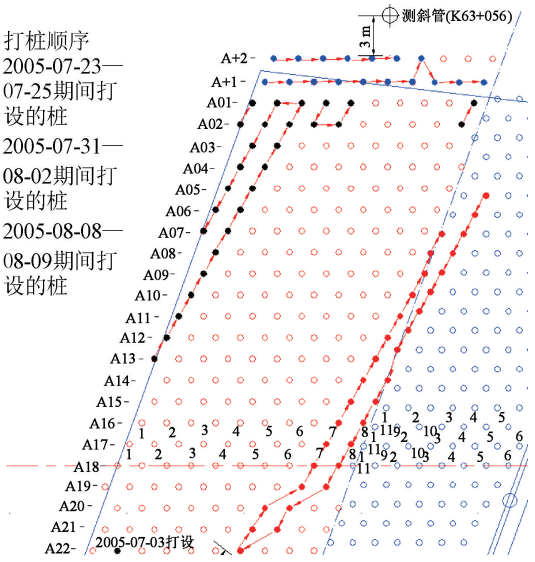


图 4 连续打桩期间周边地基土体深层水平位移监测图

Fig. 4 Monitoring layout of deep horizontal displacement of surrounding foundation soil during continuous piling

1.2.3 打桩期间混凝土芯桩桩身应力变化监测 分别在 4 根预制桩(桩号分别为 A21-8,A22-8 和 B26-4,B27-5)体内不同深度(分别为 -1.0, -6.0, -8.0, -13.0, -15.0 和 -20.0 m)预先埋设钢筋计,钢筋计与预制桩内的钢筋对接焊牢后浇筑成整体。每根桩埋设 6 只,共埋设钢筋计 24 支。现场观测连续打桩期间桩身应力的变化情况,分析远距离连续打桩施工对已完桩的影响。

2 现场测试结果与分析

2.1 孔压监测及其结果分析

分别对先后 4 次施工(施工时间不同、施工桩位距离孔压测点的水平距离不同)的全过程(振动沉管-吊装、灌料-振动拔管、补料)孔压进行了实时跟踪监测。为统一计算不同施工阶段对固定测试位置引起的孔压累积增量,将第 1 根桩打桩前的孔压值作为场地测试位置的初始值。整理成桩过程孔压测值变化曲线见图 5(a) ~ (d),为探讨孔压及孔压累积增量随沉管深度、时间和距离等的变化关系,绘制相关曲线见图 6 ~ 8。其中,图 5(a)为第 1 次沉管施工的孔压监测结果,因埋深 3.5 和 7.0 m 的两只孔压计只有沉管开始的测值(分别为 38.83 和 77.58 kPa)和沉管到底的测值(分别为 38.41 和 78.23 kPa),缺失过程数据,故未绘制孔压变化曲线。

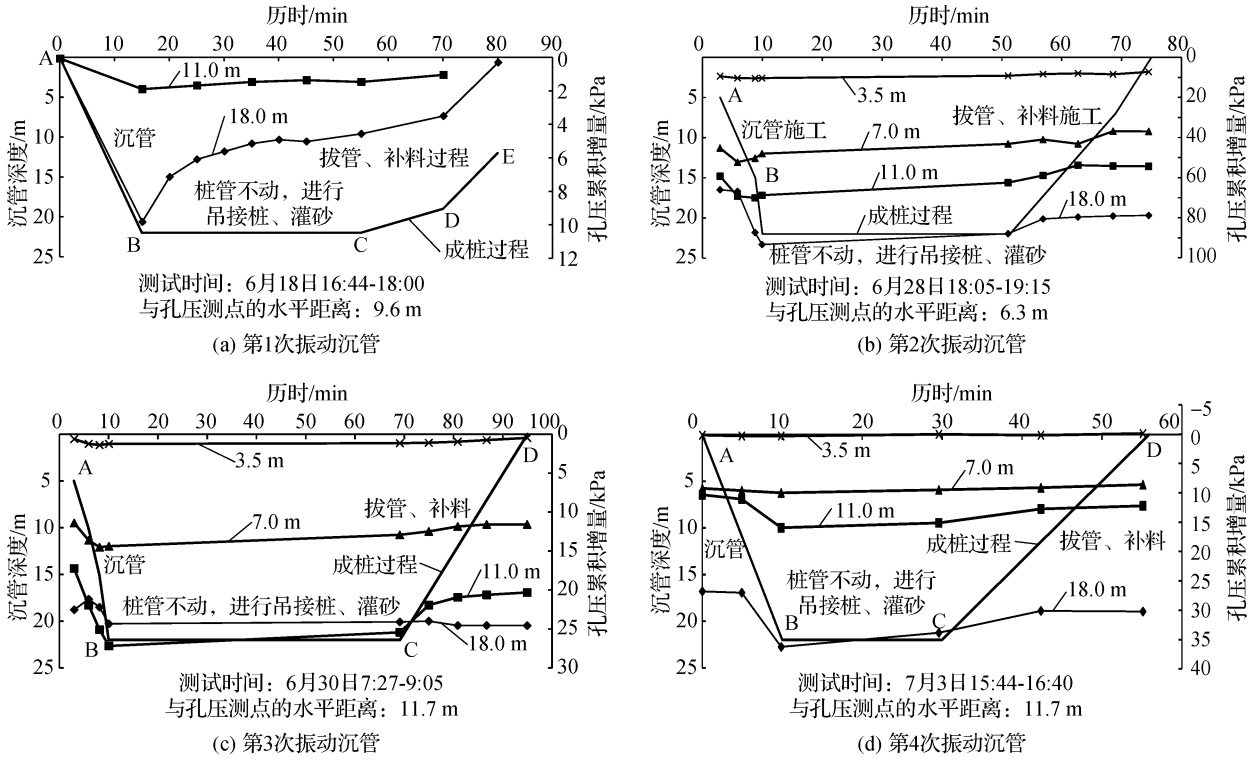


图 5　成桩过程孔压测值变化曲线

Fig. 5　Pore pressure curve in piling process

由图 5(a)可见,测点孔压随沉管运动产生的振动、挤压作用而增大,沉管到底时埋深 18.0 m 的实测孔压增量值比埋深 11.0 m 的大,反映了振动挤压荷载作用对地基深部的能量集聚和累积特性,埋深 11.0 m 的孔压计位于淤泥质粉质黏土层,18.0 m 位于粉质黏土与粉土夹杂层,土层的强度越高,沉管产生的振动挤压作用越明显。接桩和装料过程基本无荷载作用,孔压消散,拔管时管身逐渐离开地基,对地基土产生“拖曳、抽出”作用,振动的影响逐渐减弱,桩间土应力释放加快了孔压的消散。拔管后孔压值基本可恢复至沉管前,初次沉管产生的孔压累积增量通过混凝土芯砂石桩形成的竖向通道得到消散,有利于桩间土强度的恢复。

图 5(b)~(d)是第 2 次到第 4 次成桩监测结果,结合图 6~8 综合分析可以看出,实测孔压出现明显的累积增量,深度越大,累积增量值越大。在沉管-停管、灌料-拔管、补料的过程中孔压处于增长与消散的相互交替状态,深度越大,增长多于消散,其体现的累积效应也越大。图 5(b)的第 2 次成桩获取的孔压累积增量值明显较大,究其原因,一是第 2 次成桩点距离最小,约为其他 3 次成桩点距离的 2/3 和 1/2,二是该次成桩过程面临局部较硬夹层,穿越困难时将 90 kW 的振动马达换成了 120 kW,增大了 1/3 的激振能量。

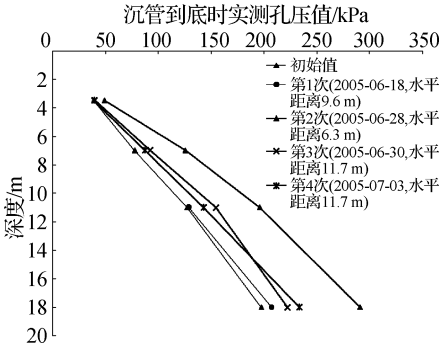


图 6　沉管到底时孔压实测值沿深度变化曲线

Fig. 6　Pore pressure curve along foundation depth at end of immersed pile pipe

综上表明,尽管混凝土芯砂石桩具有孔压消散通道,但在黏性土地基中振动沉管施工仍产生较明显的孔压累积效应,反映了荷载传递与能量集聚的过程,其程度与沉管距离、激振能量、地基土层本身的强度大小以及沉管速率等有关,体现出明显的时间性、空间性和差异性。成桩引起的孔压累积效应对新打桩、地基稳定和周围环境都会产生一定的不利影响。

从图 9 可以看出除了靠近测点施工时孔压有明显的增长外,变化过程整体较平稳。各测点孔压值均低于初始值,超静孔压总体处于负值状态,有利于地基稳定。与振动沉管的 CFG 桩、静压振动沉管的预制管桩相比,结构新颖的混凝土芯砂石桩具有较强的孔压消散能力,有利于消除孔压累积效应,保障成桩质量和地基稳定。

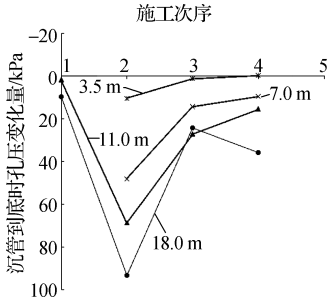


图 7 孔压变化量与打桩顺序的关系

Fig. 7 Pressure change with pile sequence

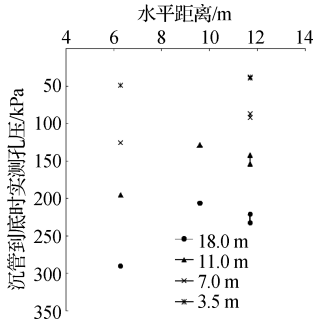


图 8 实测孔压随打桩距离的变化

Fig. 8 Pore pressure variation with distances

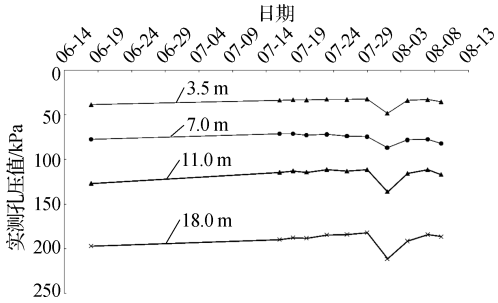
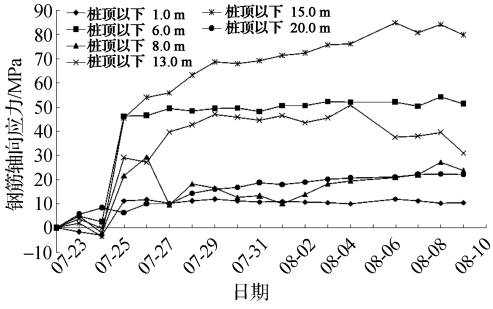


图 9 全场地施工过程孔压实测值变化

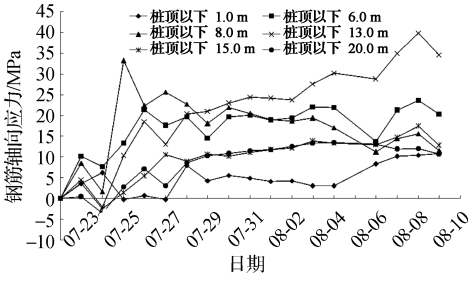
Fig. 9 Pore pressures variation with whole construction process

2.2 全场地施工过程的桩身应力监测及其分析

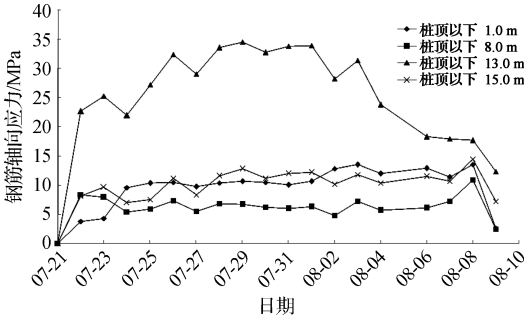
分别在 K63 +056 和 K63 +076 断面中心共 4 根混凝土芯桩内不同深度埋设钢筋计,整理全场地施工过程钢筋计测试数据并绘制曲线见图 10 ~ 11。



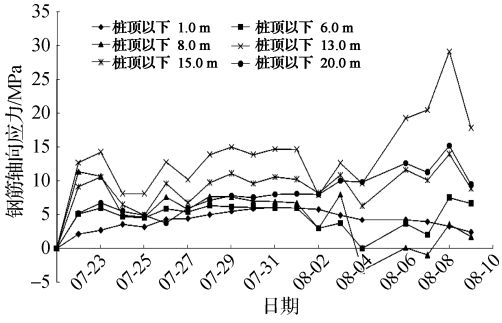
(a) K63 +056 断面桩号:A21-8



(b) K63 +056 断面桩号:A22-8



(c) K63 +076 断面桩号:B26-4



(d) K63 +076 断面桩号:B27-5

图 10 全场地施工过程混凝土芯桩钢筋轴力变化

Fig. 10 Change of steel axial force of concrete core pile in whole construction process

混凝土芯桩总体受沉管往下、侧向挤压,钢筋轴力以压应力为主,并随施工停打的交替而产生波动,但总体呈平稳增长,随着打桩过程的结束,混凝土芯桩钢筋轴力逐渐回落。A21-8 和 A22-8 两根测试桩在 7 月 23 日和 24 日出现很小的拉应力,主要是这两天打桩施工就在测试桩附近(见图 4),桩管沉拔对测试桩产生了振动和拖曳向上的拉伸效应。

测得最大钢筋轴力约为 80 MPa(A21-8 号桩 15.0 m 深度),若认为钢筋与混凝土变形协调,根据钢筋与混凝土的模量关系,将钢筋轴力换算为混凝土应力,则最大混凝土芯桩桩身应力约为压应力10 MPa,说明打桩期间混凝土芯桩受力处于安全范围。

满场地持续施工过程中桩管沉拔对混凝土芯桩产生了桩身应力累积叠加效应,叠加的结果表现为混凝土芯桩以压应力为主。相比而言,上部测点(1.0 ~ 8.0 m)钢筋轴力变化量小于中下部测点(13.0 ~ 15.0 m),说明桩身应力累积效应主要集中于中下部桩长范围内。应力累积效应反映了振动挤压荷载的传递与能量的累积过程,具有时间性、空间性和差异性,与孔压累积特性基本一致。

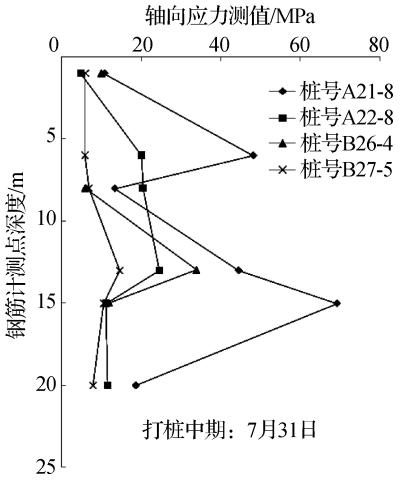


图 11　混凝土芯桩钢筋轴力沿深度分布曲线

Fig. 11　Distribution curve of axial force of concrete core piles along depth

2.3　连续打桩过程场外地基土深层水平位移监测及其分析

以 7 月 15 日的测斜管测值作为初始值,绘制打桩期间测斜管的水平位移变化曲线见图 12,其中图12(a)为 7 月 15 日至 8 月 9 日间的测斜管累计水平位移量变化曲线,图 12(b)为比较分析不同时间段、不同打桩区块施工产生的侧向水平位移量。7 月 23 日至 25 日,打桩区块与测斜管的最近距离约 20 m,施工先渐离后再渐回。7 月 31 日至 8 月 2 日,打桩区块与测斜管的最近距离约 5 m,施工先渐近后再渐离。8 月 8 日至 9 日,与测斜管平行打桩,最近距离约 3 ~ 5 m。

累计水平位移量沿深度逐渐减少,实测最大量值在 10 mm 左右,发生在地基表面。打桩引起的水平位移主要集中在地面以下约 1/3 桩长的深度范围内。打桩期间场地外地基土产生具有累积效应的侧向水平位移,量值与地基土层分布和特性、打设深度以及桩位距离等因素有关。停打期间场地外地基土侧向位移出现回复现象,说明混凝土芯砂石桩的砂壳为散粒体材料,有利于桩管拔出后桩周土挤压应力的释放和孔压消散,消减持续成桩的累积效应,减少了对场地外地基土的侧向挤压。

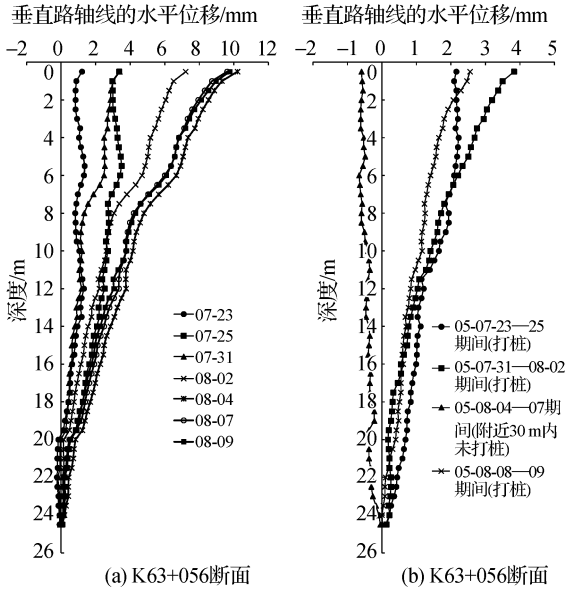


图 12　打桩期间场外地基土深层水平位移曲线

Fig. 12　Horizontal displacement curve of outside of foundation during piling

打桩对场地外地基土产生的深层水平位移的累积效应主要集中于地基上部,其特性不同于孔压和桩身应力。孔压和应力的累积主要体现了荷载(受力)传递和能量集聚,地基中下部易集聚而难耗散。而水平位移的累积主要体现在土体的变形,与土体性质(结构、孔隙和强度等)和上覆压力有关,深度越浅,上覆压力和侧向限制越小,位移量越大。

3 基于圆孔扩张理论对成桩效应的分析和探讨

3.1 混凝土芯砂石桩振动沉管过程的成桩效应分析

混凝土芯砂石桩振动沉管工艺为非排土工艺,桩管压住预制混凝土桩尖,在大功率(一般 90 kW,当遇到坚硬夹层时需要加大至 120 kW)马达振动 + 竖向加压联合作用下逐渐沉入地基。桩间土主要受到桩管激振力和挤压力作用,挤压力主要由来自桩靴的 45°斜向下的挤压力、来自管身的径向挤压力和管身侧壁向下的摩擦力 3 部分合力构成,合力方向为斜向下指向桩间土。激振力和挤压力的强度和大小随径向距离的增大而逐渐衰减。越靠近管身,作用强度越大。沉管对桩间土的挤压导致桩间土内产生较大的超静孔压和位移,沉管过程是振动挤压效应的逐渐累积过程。

沉管到底后桩管静止不动,进行接桩、灌料施工,灌料过程基本不存在挤土效应,灌注的砂石料是松散的散粒体材料,有利于桩周土应力释放和孔压消散,该阶段是挤土效应的消散和累积效应的消减过程。

振动拔管补料过程,桩管振动上拔对桩周土产生“振动拖曳”作用,具有集聚效应,但对地基土又产生类似于“抽吸”的效应,对孔压特别是中上部土体中的孔压消散作用明显,具有消散效应,集聚与消散作用相互叠加,随着桩管逐渐脱离地基,“振动拖曳”作用越来越弱,消散作用占据主导,成桩效应处于消减状态。全场地施工时成桩效应具有一定的时间与空间的累积特性,但最终随着施工的完成,累积效应逐渐消减。

3.2 混凝土芯砂石桩沉管挤土效应的理论计算分析

不考虑复杂的振动影响,可运用圆孔扩张理论对混凝土芯砂石桩沉桩挤土效应进行计算分析,其基本假定为:① 按轴对称平面问题进行分析;② 土体是均匀各向同性的理想弹塑性材料;③ 沉桩过程中土体不可压缩;④ 土体变形符合莫尔-库伦强度准则。根据 Henkel 和 Wade 提出的适用于完全饱和土的超孔隙水压力的计算方法,可导出沉桩过程中桩周土超孔隙水压力为[10]:

$$\Delta u = \Delta u_{\max} - 2C_{\mathrm{u}}\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \tag{1}$$

其中:

$$\Delta u_{\max} = \left[\frac{\sqrt{6}}{3}a + \ln\left(\frac{E}{2(1+\mu)C_{\mathrm{u}}}\right)\right]C_{\mathrm{u}} \tag{2}$$

式中:E 为土的弹性模量;μ 为土的泊松比;C_{u} 为土的不排水强度;r_0 为桩体半径;α 为 Henkel 孔压系数。

当某个径向距离沉管引起的超静孔压为零时,则该径向距离值为沉管径向影响范围值。令式(1)为零,有:

$$r_{\max} = r_0\exp\left(\frac{\Delta u_{\max}}{2C_{\mathrm{u}}}\right) \tag{3}$$

得到沉管径向影响范围理论值为 $\left[r_0, r_0\exp\left(\frac{\Delta u_{\max}}{2C_{\mathrm{u}}}\right)\right]$。

以本工程为例,混凝土芯砂石桩桩径 0.5 m,工勘揭示的 8 个孔土层十字板剪切强度统计及泊松比取值见表 2,土的弹性模量 E 根据工勘提供的压缩模量 E_{s} 进行换算得到,目前有两种方法,一是按弹性理论推出的弹性模量与压缩模量之间的关系来计算,计算式如下:

$$E = \frac{1-2\mu^2}{1-\mu}E_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

另一是参考经验公式 $E=(2.0\sim5.0)E_{\mathrm{s}}$,本文取 $E=3.5E_{\mathrm{s}}$。两种方法的计算结果见表 3。

表 2　土层十字板强度统计与泊松比取值

Tab. 2　The strength C_u statistics and poisson ratio value of soil layer

土层	土 名	C_u平均值/kPa								泊松比 μ
		1#	2#	3#	4#	10#	11#	13#	14#	
②	淤泥质粉质黏土	39.3	36.7	53.0	45.5	41.6	40.6	44.6	53.0	0.475
③	粉质黏土夹粉土	69.5	54.8	90.0	86.0	91.0	84.0	43.5	86.0	0.400
④	粉质黏土	93.5	47.0	/	82.0	93.5	85.3	60.7	98.0	0.425

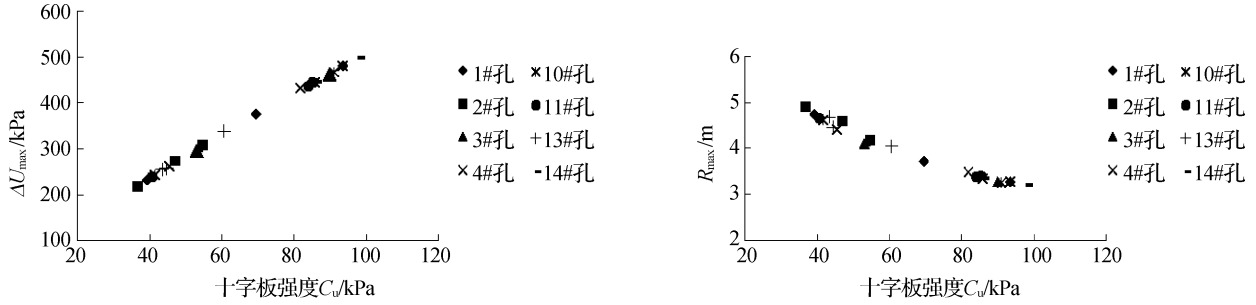
表 3　沉管引起的 Δu_{max} 和 r_{max} 计算值

Tab. 3　Calculated Δu_{max} & r_{max} value caused by pile driving

土层	土　名	Δu_{max}/kPa 和 r_{max}/m(弹性模量按经验取值换算)							
		1#	2#	3#	4#	10#	11#	13#	14#
②	淤泥质粉质黏土	231.3/4.74	218.5/4.91	296.1/4.08	261.1/4.41	242.5/4.61	237.6/4.67	256.8/4.45	296.1/4.08
③	粉质黏土夹粉土	374.9/3.71	308.6/4.18	462.2/3.26	445.6/3.33	466.3/3.24	437.2/3.37	255.0/4.69	445.6/3.33
④	粉质黏土	480.2/3.26	273.7/4.60	/	431.9/3.48	480.2/3.26	445.9/3.41	338.0/4.05	498.7/3.18
土层	土　名	Δu_{max}/kPa 和 r_{max}/m(弹性模量按理论公式换算)							
		1#	2#	3#	4#	10#	11#	13#	14#
②	淤泥质粉质黏土	183.8/2.59	174.2/2.68	232.0/2.23	206.1/2.41	192.2/2.52	188.6/2.54	202.9/2.43	232.0/2.23
③	粉质黏土夹粉土	296.5/2.11	246.8/2.38	360.7/1.85	348.6/1.90	363.7/1.84	342.5/1.92	206.0/2.67	348.6/1.90
④	粉质黏土	372.9/1.84	219.8/2.59	/	337.8/1.96	372.9/1.84	348.0/1.92	268.3/2.28	386.2/1.79

注:表中"/"前后数值分别对应 Δu_{max}/和 r_{max}。

利用圆孔扩张理论解答计算沉桩引起的最大超静孔压和最大径向距离与土体强度的相关曲线见图 13。



(a) 沉管产生的最大孔压值与土体十字板强度的关系　　(b) 沉管影响的最大径向距离与土体十字板强度的关系

图 13　沉桩引起的 Δu_{max} 和 r_{max} 与土体强度的关系曲线

Fig. 13　Relationship between Δu_{max} and r_{max} value caused by pile driving and soil strength

根据式(1)振动沉管工艺产生的超静孔压在紧靠桩身的桩周土最大,在本工程实例中,Δu_{max} 计算值达到数百千帕,随着土体十字板强度的提高而基本呈线性增长。沉管引起的最大径向位移 r_{max} 随土体十字板强度呈自然指数减少,不超过 5 m(即 10 倍桩径)。上述结果反映出土质越硬,强度越高,沉管产生的超静孔压越大,而引起的径向位移则越小,与沉管施工与土体相互作用的物理规律以及现场实测结果基本吻合。

弹性模量是土体处于弹性变形阶段时的性能参数,在振动沉管过程中土的弹性变形阶段很短暂,往往是瞬时性的。表 3 表明分别采用理论公式法和经验取值法将土体压缩模量换算为弹性模量来计算 Δu_{max} 和 r_{max},结果差异较大。计算式(4)显示土的泊松比是唯一参数,泊松比取决于土的类别,同一类土差异较小,

一般粉土的泊松比为 0.35 ~ 0.40,粉质黏土为 0.40 ~ 0.45,黏土为 0.45 ~ 0.50。分别取最大值、最小值和平均值计算弹性模量,结果见图 14,可见泊松比的取值变化对弹性模量的影响不大,弹性模量与压缩模量的比值为 1.04 ~ 1.13。从 Δu_{max} 计算值大小与实际情况的适合性来看,理论公式法较好。

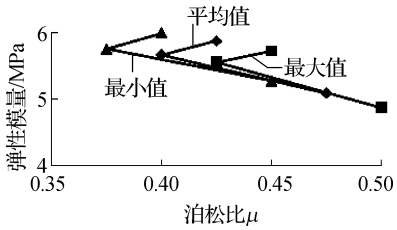


图 14 泊松比与弹性模量的关系

Fig. 14 Relationship between poisson ratio and elastic modulus

沉管过程及其成桩效应十分复杂,是一个复杂荷载的作用、传递以及能量的累积过程,在一定假设和简化条件下,圆孔扩张理论得到的计算结果(Δu_{max},r_{max} 等)主要与土的性质有关(土类、模量、泊松比、孔压系数及不排水强度等),但不能反映沉管的过程性(深度、时间等)和挤土效应的累积特性。其理论结果显示挤土效应径向影响距离不超过 5 m(即 10 倍桩径),而本工程的实际监测表明,成桩的影响距离大大超过了理论结果。在较硬的粉质黏土与粉土夹杂层,桩管振动与挤压对桩间土的作用是强烈的。圆孔扩张理论可以体现一些定性规律,但定量结果误差较大。

4 结 语

(1) 首次对采用振动沉管工艺施工的混凝土芯砂石桩在远距离单桩施工全过程、全场地持续施工过程中进行孔压、周边土体深层水平位移和混凝土芯桩桩身应力的实时跟踪监测,获取了各监测量的变化规律和特点。

(2) 通过现场监测分析指出,混凝土芯砂石桩振动沉管施工具有明显的、机理各异的成桩效应累积特性,孔压和应力的累积主要集中于地基中下部,而位移的累积主要集中于地基上部,累积特性反映了振动挤压荷载的传递、能量累积以及通过砂石外壳通道耗散相互交替、作用和叠加的复杂过程,与沉管距离、激振能量、土的性质和强度以及沉管速率等因素有关,具有明显的时间性、空间性和差异性。

(3) 混凝土芯砂石桩的砂石外壳通道对孔压和深层水平位移的累积效应的消散作用明显。施工过程中总体保持负的超静孔压状态。场地外地基深层水平位移最大值在 10 mm 左右,停止施工时出现明显位移回弹现象。混凝土芯桩桩身主要承受安全的压应力。

(4) 从沉管-停管灌料-拔管补料 3 个阶段对混凝土芯砂石桩的成桩挤土效应进行了分析,运用圆孔扩张理论进行了计算。结果与沉管施工与土体相互作用的物理规律以及现场实测结果基本吻合。采用泊松比换算弹性模量来计算 Δu_{max} 和 r_{max} 得到的结果较好。挤土径向影响距离不超过 5 m(即 10 倍桩径),远小于本工程的实测结果。圆孔扩张理论不能反映沉管的过程性(深度、时间等)和挤土效应的累积特性,有一定的局限性。

参 考 文 献:

[1] 赵维炳, 唐彤芝, 蔡新, 等. 加固深厚软基的新方法-混凝土芯砂石桩复合地基法: 中国, CN200610037621.2[P]. 2006-10-03. (ZHAO Weibing, TANG Tongzhi, CAI Xin, et al. A new method of improving soft soil: composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles: China, CN200610037621.2[P]. 2006-10-03. (in Chinese))

[2] 唐彤芝, 赵维炳, 关云飞, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基加固深厚软基技术研究成果报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (TANG Tongzhi, ZHAO Weibing, GUAN Yunfei, et al. The research report of the new technology on composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))

[3] 唐彤芝, 赵维炳, 陈俊生, 等. 高填土路堤荷载下混凝土芯砂石桩复合地基变形与承载力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1829-1836. (TANG Tongzhi, ZHAO Weibing, CHEN Junsheng, et al. Experimental study on deformation and bearing capacity of composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles under high embankment load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1829-1836. (in Chinese))

[4] 程万钊, 乐茂华, 王富永, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基加固堤防软基试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊 1): 675-681. (CHENG Wanzhao, YUE Maohua, WANG Fuyong, et al. Field tests study of concrete-cored sand-gravel piles applied to strengthen embankment engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Suppl1): 675-681. (in Chinese))

[5] 唐彤芝, 王芮文, 尹建斌, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基排水固结特性及试验研究[J]. 公路, 2007(12): 4-8. (TANG Tongzhi, WANG Ruiwen, YIN Jianbin, et al. The research of consolidation and test with concrete-cored sand-gravel piles[J]. Highway, 2007(12): 4-8. (in Chinese))

[6] 叶观宝, 张晴雯, 赵维炳. 混凝土芯砂石桩载荷试验及沉桩数值分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 41-48. (YE Guanbao, ZHANG Qingwen, ZHAO Weibing. Numerical analysis of loading test and pile penetration of concrete-core sand-gravel piles[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2015, 35(1): 41-48. (in Chinese))

[7] 杨燕伟, 关云飞, 李锦涛. 混凝土芯砂石桩复合地基固结计算[J]. 水利水运工程学报,2016(3): 46-52. (YANG Yanwei, GUAN Yunfei, LI Jintao. A calculation method for consolidation of concrete core sand-gravel piles composite foundation under embankment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 46-52. (in Chinese))

[8] 鲁绪文, 何宁, 关秉洪, 等. 混凝土芯砂石桩的沉桩挤土效应及超孔隙水压力变化[J]. 水利水运工程学报, 2006(4): 41-45. (LU Xuwen, HE Ning, GUAN Binghong, et al. Soil squeezing effect of concrete-cored sand-gravel piles and excess pore water pressure dissipation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(4): 41-45. (in Chinese))

[9] 俞缙, 戚志博, 蔡燕燕, 等. 低标号混凝土芯砂石桩复合地基固结计算方法[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 218-223, 240. (YU Jin, QI Zhibo, CAI Yanyan, et al. Study on consolidation calculation of low-grade concrete-cored sand-gravel pile composite foundation[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 218-223, 240. (in Chinese))

[10] 唐彤芝, 赵维炳. 基于圆孔扩张理论的 CFG 桩成桩效应计算分析[J]. 水运工程, 2005(4): 17-21. (TANG Tongzhi, ZHAO Weibing. Computational analysis for compaction effect of CFG pile based on the theory of cavity expansion[J]. Port and Waterway Engineering, 2005(4): 17-21. (in Chinese))

Study on compaction effect and its accumulation characteristics of concrete-core sand-gravel pile with vibrating immersed tube technology

TANG Tongzhi, MING Jingping, GUAN Yunfei, ZHAO Weibing

(*Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: Concrete-core sand-gravel pile is composed of high strength precast concrete-core pile and permeable sand-gravel shell, and vibrating immersed tube technology is often used to reinforce soft soil foundation. In view of the characteristics of the new-type concrete-core sand-gravel pile, the compaction effect and its characteristics caused by the vibrating immersed tube technology in soft clay foundation are tested and analyzed on site and calculated theoretically. Through the whole process of long-distance construction of four piles and the continuous construction of the whole site, the real-time tracking and monitoring of the pore water pressure, the deep horizontal displacement of surrounding soil and the stress of concrete core pile body are conducted. The variation rules and characteristics of each monitoring quantity are obtained. This study reveals the effects of the cumulative characteristics of the continuous construction of vibrating sunken tube on the variation of each monitoring quantity, points out that the construction process of vibratory sunken tube integrates the combined action of static and dynamic load on foundation soil, and brings to light the characteristics of continuous accumulation of energy in space and time caused by load transfer. Based on the theory of cavity expansion, the excess pore water pressure and radial displacement of the concrete-core sand-gravel pile submerged pipe are calculated and the adaptability of theoretical solution to practical situation is discussed.

Key words: concrete-cored sand-gravel pile; vibrating immersed tube; compaction effect; accumulation characteristic; cavity expansion theory