

文章编号:1673-2049(2016)04-0090-07

水泥搅拌桩施工引起深层土体水平位移分析

王志丰,王亚琼,谢永利

(长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:针对水泥搅拌桩施工时水泥浆的注入对周围地层造成扰动,从而引起土体发生水平位移的问题,介绍了以柱形圆孔扩张理论为基础的 Chai 方法及其计算步骤,应用 Chai 方法分析了试桩 C1, C2 的现场试验数据。结果表明:当 C1 完工时,实测水平位移随深度的改变而变化,水平位移最大值达到 34 mm,桩底以下土体也会产生一定的水平位移;当 C2 完工时,实测水平位移随深度的变化趋势与单桩(C1)施工情况的变化趋势基本一致,水平位移最大值达到 72 mm;Chai 方法可以用于计算单根水泥搅拌桩施工的情况,而对于多桩施工情况,无法考虑施工顺序和桩身强度的影响,产生较大的计算误差;以土体水平位移不超过 10 mm 作为施工的安全控制值时,单根水泥搅拌桩施工对周围环境的影响范围大约为 9 m。

关键词:地基处理;水泥搅拌桩;现场试验;水平位移;圆孔扩张理论;影响范围

中图分类号:TU472.5

文献标志码:A

Investigation Into Lateral Displacement of Subsoils Induced by Installing Soil-cement Columns

WANG Zhi-feng, WANG Ya-qiong, XIE Yong-li

(Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Chang'an University,
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: During the installation process of soil-cement columns, the surroundings of ground would be disturbed due to injection of grout, which could cause significant lateral displacements of subsoils. Chai's method and its calculation procedure, which was developed based on the theory of cylindrical cavity expansion, were introduced. Chai's method was adopted to analyze the field test results of installing two soil-cement columns (C1 and C2). The results shows: after the construction of C1, the measured lateral displacements change with the variation of construction depth, and the maximum value can reach to 34 mm, and there are some lateral displacements under the bottom of column; when the installation of C2 is completed, the variation of measured displacements with depth is identical with the trend after the installation of C1, and the maximum value can reach to 72 mm. Chai's method can be used to predict the lateral displacements caused by installing a single column, however there will be some discrepancy for the case constructing several columns due to that the effects of construction sequence and the column strength cannot be considered in Chai's method. If the lateral displacement to be less than 10 mm is taken as safety control value, the influence range caused by the installation of single soil-cement column is

收稿日期:2016-03-02

基金项目:中国博士后科学基金项目(2015M570803,2016T90877);陕西省博士后科研项目;

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821153312,310821161022)

作者简介:王志丰(1986-),男,河南汤阴人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:zhifeng.wang@chd.edu.cn。

about 9 m away from the column center.

Key words: ground improvement; soil-cement column; field test; lateral displacement; theory of cavity expansion; influence range

0 引 言

随着中国基础设施的不断完善,水泥搅拌桩技术已经在中国土木工程领域得到了广泛的应用,如高速公路建设中软土路基的处理等^[1-4]。水泥搅拌桩技术最早起源于日本,与其他混凝土桩不同^[5-9],其基本原理是将搅拌机械插入土层中,并注入水泥浆与土体搅拌混合,最终形成具有较高强度的水泥土桩^[10]。水泥搅拌桩技术主要分为湿喷法和干喷法 2 种^[11],湿喷法施工时喷入的是液体状水泥浆,而干喷法施工时喷入的是水泥粉。经过多年的发展,各国学者在水泥搅拌桩复合地基承载性状、沉降性状等方面都取得了较多的研究成果。郑刚等^[12]通过单桩静载试验成果和复合地基荷载试验成果,研究了软土中水泥搅拌桩复合地基的承载特性。马克生等^[13]通过现场试验研究了试桩与工程桩复合地基的确定方法。马洪友等^[14]通过多种工况下的水泥搅拌桩荷载试验研究了复合地基的作用机理。闫超等^[15]通过室内模型试验研究了添加土工格栅的水泥搅拌桩的水平承载特性。胡贺松等^[16]通过现场试验,分析了单桩复合地基与四桩复合地基的沉降变形特性。沈一帆等^[17]通过颗粒流数值模拟方法探讨了基坑支护中水泥搅拌桩水平位移的主要影响因素。Shen 等^[18]通过室内试验与理论分析相结合的方法研究了水泥搅拌桩与土体的相互作用机理。

事实上,水泥搅拌桩施工时会对周围土层造成一定的扰动,如引起超静孔隙水压力及周边土体变形等,然而目前这方面的研究成果相对较少,主要包括一些室内试验成果、现场试验成果以及部分理论分析成果。沈水龙等^[19]基于日本有明粘土的室内试验成果,分析了搅拌桩施工引起的孔隙水压力的变化规律。关云飞等^[20]利用圆孔扩张理论^[21],得到了搅拌桩引起土层中超静孔隙水压力的计算方法及变化规律。Chai 等^[22]基于柱形圆孔扩张理论,提出了适用于湿喷法和干喷法 2 种情况的水泥搅拌桩施工引起土体侧向位移的方法(简称 Chai 方法)。

本文首先对 Chai 方法进行了概述,然后依托水泥搅拌桩的现场工程实例,研究了施工引起深层土体水平位移随深度的变化规律。将实测水平位移与

采用 Chai 方法得到的计算结果进行了对比,分别探讨了 Chai 方法对于单桩和多桩施工情况下的适用性,并分析了水泥搅拌桩的施工影响范围。

1 Chai 方法概述

水泥搅拌桩技术作为一种地基处理方法广泛应用于高速公路路堤建设中(图 1),其施工过程中由于注入了一定压力的水泥浆(或水泥粉),引起地层内部膨胀,从而对周围土层造成扰动。这种膨胀引起的扰动可以近似认为等同于平面内的圆孔扩张问题。

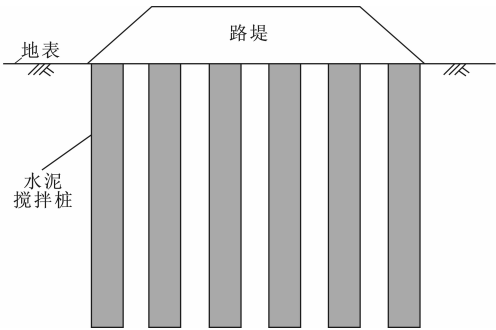


图 1 水泥搅拌桩加固软基
Fig. 1 Soil-cement Columns Applied to Improve Soft Foundation

图 2 给出了全无限空间的柱形圆孔扩张理论示意,其中, R_u 为极限区半径, P_u 为圆孔极限压力, R_p 为塑性区半径, σ_p 为塑性区边界处应力, σ_r 为径向应力, σ_θ 为切向应力, r 为到圆心的距离。由图 2 可知,平面内圆孔受到外力作用发生膨胀,导致周边形成塑性变形区与弹性变形区。基于此,Chai 等提出了适用于湿喷法和干喷法 2 种情况的水泥搅拌桩施工引起土体侧向位移的方法,具体计算公式如表 1 所示。

对于采用干喷法施工的搅拌桩,Chai 考虑了注浆量为 $0.036\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ 、土体模量 E_0 为 $2\,250\text{ kPa}$ 时的情况,此时对应的圆孔半径 R_{u0} 取为 0.46 m 。采用 Chai 方法计算侧向位移的大致步骤如下:

- (1)确定土体参数及施工参数,首先根据公式(1)和公式(2)得到极限区半径 R_u ,然后根据公式(3)和公式(4)计算塑性区半径 R_p 。
- (2)根据公式(5)确定塑性区边界处的位移 δ_p ,然后根据公式(6)或者公式(7)计算目标位置的侧向

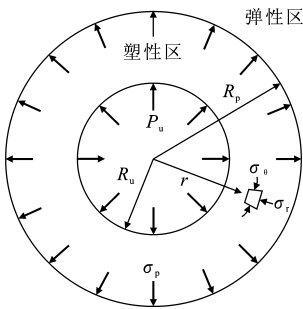


图 2 柱形圆孔扩张理论示意

Fig. 2 Schematic Diagram of Theory of Cylindrical Cavity Expansion

表 1 Chai 方法计算公式

Tab. 1 Equations in Chai's Method

参数	计算公式	公式编号
极限区半径	$R_u = R_{u0} (E_0 / E)^{1/3}$	(1)
	$R_{u02} = R_{u01} - \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2\pi R_{u01}}$	(2)
塑性区半径	$R_p = \sqrt{I_r} R_u$	(3)
	$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)c_u}$	(4)
塑性区边界处位移	$\delta_p = \frac{1+\nu}{E} R_p c_u$	(5)
塑性区位移	$\delta = \frac{2R_p + \delta_p}{2r + \delta_p R_p / r} \delta_p$	(6)
弹性区位移	$\delta = \frac{R_u^2}{2r}$	(7)

注： c_u 为不排水抗剪强度； δ_p 为塑性区边界处位移； I_r 为刚度系数； ν 为泊松比； E 为弹性模量； R_{u0} 为当土体模量为 E_0 时的圆孔半径； R_{u01} 为当有效注浆量为 Δ_1 时的圆孔半径； R_{u02} 为当有效注浆量为 Δ_2 时的圆孔半径； δ 为位移。

位移。

2 工程概况

施工场地位于上海，在基坑开挖之前需要对周边地层进行加固，拟采用干喷水泥搅拌桩工法。由于待开挖基坑周边低层民房较多，为了防止水泥搅拌桩施工引起较大的土层变形，给周边环境带来不利影响，在施工之前进行了试桩以分析施工引起的深层土体水平位移情况。

2.1 现场土质条件

上海地层属于典型的软土地区，该区域地层的含水量较高，压缩性较强，强度较低，渗透性较差，对于工程建设十分不利，因而在施工之前往往需要对软土地基进行加固处理。表 2 给出了施工现场土体物理力学性质的统计情况，其土层分布如下：①填土，该土层的厚度大致为 2.5 m；②粉质粘土，该土层厚度大致为 4.5 m；③软粘土，该土层厚度大致为 11 m；④硬粘土，该土层厚度大致为 4.5 m；⑤粉砂，

表 2 施工现场土体参数

Tab. 2 Soil Properties in Field

土层剖面	厚度/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e_0	含水量 $w/\%$
填土	2.5	20.0	0.71	23.6
粉质粘土	4.5	18.1	0.83	28.3
软粘土	11.0	17.6	1.27	44.0
硬粘土	4.5	18.4	0.87	32.0
粉砂	12.5	18.9	0.90	37.0

该土层厚度大致为 12.5 m。

从表 2 可以看出，水泥搅拌桩试桩主要处于填土层和粉质粘土层，离软粘土层较近。图 3 给出了粉质粘土和软粘土的颗粒级配曲线。由图 3 可知，施工深度范围以及距离较近区域的土层主要以细颗粒（粘粒和粉粒）为主。

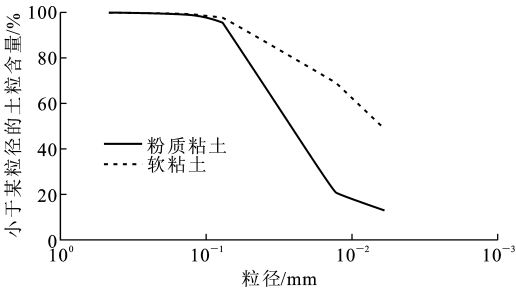


图 3 粉质粘土与软粘土的颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle-size Distribution Curves for Silty Clay and Soft Clay

2.2 桩位布置情况

图 4 描述了现场水泥搅拌桩的平面布置与断面布置。试验共完成试桩 C1, C2, 首先施工 C1, 然后施工 C2, 2 根试桩的长度均为 6.0 m, 设计桩径均为 0.6 m, 桩心的间距为 2.4 m。

待开挖基坑深度约为 10.0 m, C2 与待开挖基坑边缘大约 4 m 的距离。此外，在距离桩心 2.5 m 处的位置埋设了 1 根土体测斜管，以实测水泥搅拌桩施工引起的深层土体水平位移。土体测斜管与 2 根试桩的垂直距离均为 1.2 m, 其深度大约为 8.0 m。水泥搅拌桩的施工参数为：水泥掺入比约为 15%（质量分数），水泥粉的喷射压力约为 0.6 MPa。

3 实测结果分析与讨论

依据干喷法的注浆参数、设计桩径以及 Chai 方法中的公式(2)，可以得到该工程实例中 R_{u0} 取值为 0.46 m。从 Chai 方法的公式可以发现，水平位移的主要控制参数为极限区和土层模量。事实上，由于 Chai 方法平面假设的局限性，对于单一均匀土层，若弹性模量上下相同，则计算出的水平位移应当沿

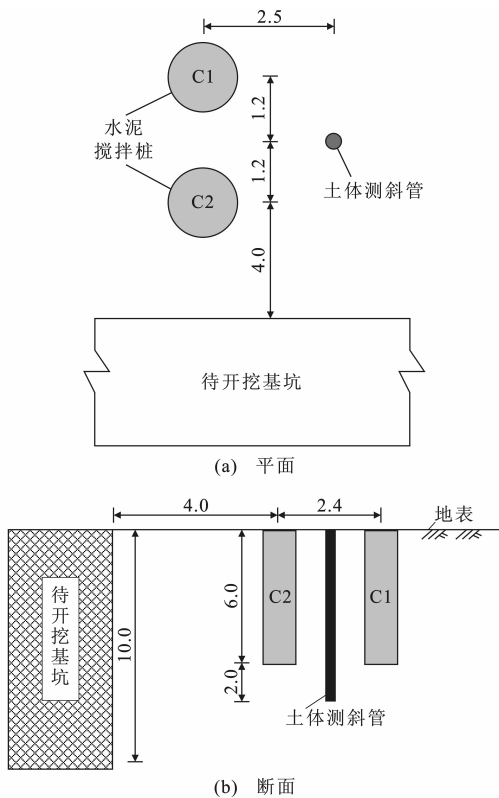


图 4 施工现场水泥搅拌桩布置(单位:m)

Fig. 4 Layout of Soil-cement Columns in Field (Unit:m)

深度不变。在该计算中,根据已有文献关于上海类似土层的力学参数统计结果选取^[23-24]:填土层模量为 6.0 MPa,粉质粘土层模量为 3.0 MPa。

图 5 给出了 C1 施工完成后的土体水平位移实测数据与计算值对比曲线。由图 5 可知:实测水平位移随深度的改变而变化,呈现出近似先增大后减小的规律,最大值约为 34 mm,最大值的发生深度约在地表以下 3 m 处,位于粉质粘土层中;桩底以下土体也会产生一定的水平位移,距离桩底越远,位移实测值越小。此外,从图 5 还可以看出,对于填土层和粉质粘土层,采用 Chai 方法计算的结果均沿深度不变,总体上略小于实测值,其主要原因是 Chai 方法忽略了相邻土层对水平位移的限制作用,计算中未考虑土层模量沿深度的变化情况。

图 6 为相邻土层对水平位移的限制作用示意,不同土层的物理力学参数不同,对水平位移的限制作用也不同,可以理解为土层模量随深度改变而变化^[25]。图 5,6 也展示出了 Chai 方法存在的局限性,即只能计算桩身侧边土体的水平位移,而无法计算桩底以下(或桩顶以上)土体的水平位移。

图 7 给出了 C1,C2 两根试桩施工完成后的土体水平位移实测数据与计算值对比曲线。由图 7 可

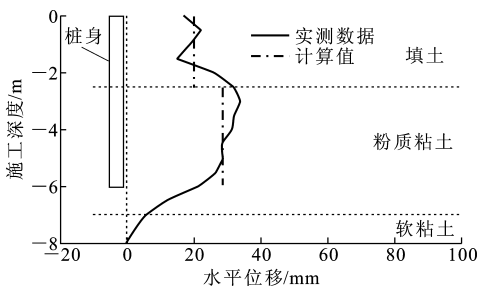


图 5 C1 施工完成后水平位移实测数据与计算值对比曲线

Fig. 5 Comparisons of Measured Data and Calculation Values of Lateral Displacement After Construction of C1

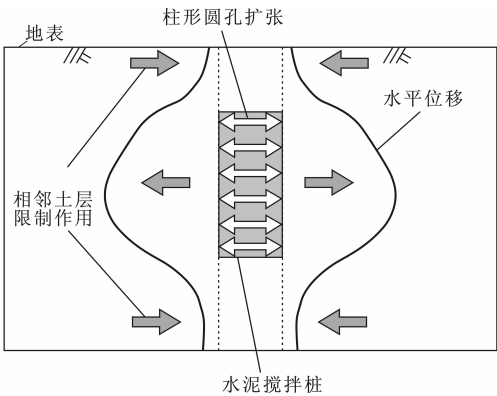


图 6 上下相邻土层对水平位移的限制作用示意

Fig. 6 Illustration of Restriction Effect of Adjacent Soil Layers on Lateral Displacement

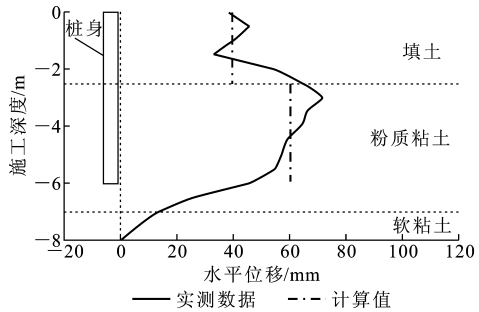


图 7 C1 和 C2 施工完成后水平位移实测数据与计算值对比曲线

Fig. 7 Comparisons of Measured Data and Calculation Values of Lateral Displacements After Construction of C1 and C2

知:在 2 根试桩施工完成之后,水平位移实测数据随深度改变而变化的趋势与单桩施工情况的变化趋势基本一致,呈现出近似先增大后减小的规律,最大值约为 72 mm,最大值的发生深度约在地表以下 3 m 处,位于粉质粘土层中;桩底以下的实测水平位移比单桩施工引起的水平位移要大,同时随着距离桩底越远,位移实测值越小。由图 7 还可以看出,Chai 方法得到的计算结果小于实测数据,并且计算误差

相对于单桩的情况增大了较多,主要原因是 Chai 方法对于多桩情况只能利用简单的叠加原理,无法反映实际情况中水泥搅拌桩的施工顺序与桩身强度对水平位移的影响。在 C1 先施工完成之后,水泥发生凝结硬化,搅拌桩强度高于周边土体。因此,在 C2 施工期间,搅拌桩 C1 会限制土体在 C1 方向产生位移,将间接地增大土体在其他方向的位移。随着水泥搅拌桩施工数量的增多,采用 Chai 方法得到的计算结果误差也将逐渐增大。

根据该工程的施工参数与土体参数得到了单根水泥搅拌桩施工引起的深层土体位移随桩心距离的变化曲线,如图 8 所示。基于此,可以从水平位移的角度探讨水泥搅拌桩的施工影响范围。由图 8 可知,深层土体水平位移随桩心距离的增大而快速减小,当与桩心距离为 1 m 时,水平位移约为 91.2 mm,而当与桩心距离为 10 m 时,水平位移则减少为 9.1 mm。采用文献[26]关于水平旋喷桩施工影响范围的分析思路,以水平位移不超过 10 mm 作为施工时的安全控制值,则不难发现当与桩心距离超过 9 m 时,深层土体水平位移将小于安全控制值,即表示水泥搅拌桩施工的影响范围约为 9 m。

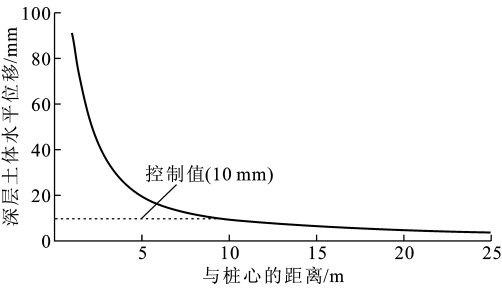


图 8 深层土体水平位移随桩心距离变化曲线

Fig. 8 Variation of Lateral Displacements of Subsoil with Distance to Column Center

事实上,也可以从水泥搅拌桩施工引起的超静孔隙水压力来探讨其影响范围。考虑到该工程实例未对孔隙水压力进行实测,因此搜集了文献[18],[25]的相关数据。图 9 给出了超静孔隙水压力实测数据与半径比的归一化关系^[18]。本文在实测数据基础上,通过回归分析得到图 9 中表达两者归一化关系的经验公式,即

$$\Delta u_{\max}/c_u = 1.6(r/R_c)^{-1.56} \quad (8)$$

式中: Δu_{\max} 为超静孔隙水压力最大值; R_c 为水泥搅拌桩半径,取为 0.6 m。

采用文献[25]关于水平旋喷桩施工影响范围的分析思路,以施工引起土层中超静孔隙水压力反应小于 3% 作为控制值,则将 $\Delta u_{\max}/c_u = 3\%$ 代入公式

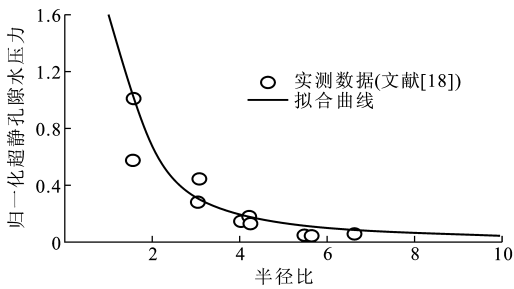


图 9 超静孔隙水压力与半径比的归一化关系

Fig. 9 Normalized Relationship Between Excess Pore Water Pressure and Radius Ratio

(8)进行简单推算,可以得到桩心距离 r 应当超过 $14R_c$ 。因此,从超静孔隙水压力的角度考虑,水泥搅拌桩施工的影响范围约为 8.4 m,与该工程实例中水平位移实测数据分析结果存在较好的相关性。

本文还搜集了其他施工方法产生的超静孔隙水压力实测数据来对比水泥搅拌桩施工的影响范围^[4,9]。水泥搅拌桩与高压旋喷桩都属于粘结材料桩,其施工工艺与预制桩施工存在较大的不同,因此其对周围土体的影响范围也大不相同。

图 10 给出了水泥搅拌桩、高压旋喷桩和预制桩施工引起的超静孔隙水压力最大值 Δu_{\max} 与有效应力 σ'_v 之比 ($\Delta u_{\max}/\sigma'_v$) 随半径比的变化关系。由图 10 可以看出:预制桩打桩施工引起了超静孔隙水压力的大幅度升高,最大值可以达到 1.5 倍的有效应力;高压旋喷桩施工对周围土体的影响相对较小,引起的超静孔隙水压力可以达到有效应力的 50%;水泥搅拌桩施工则是 3 种施工工艺之中对周围土体影响最小的方法,其引起的超静孔隙水压力可以达到有效应力的四分之一。

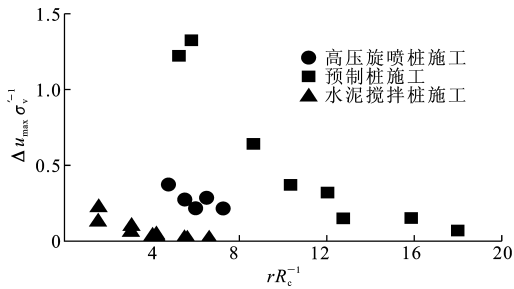


图 10 超静孔隙水压力与有效应力之比随半径比的变化

Fig. 10 Variation of Ratio of Excess Pore Water Pressure to Effective Stress with Radius Ratio

4 结 语

(1) 当 C1 完工时,实测水平位移随深度的改变而变化,呈现出近似先增大后减小的规律,最大值约

为34 mm,最大值的发生深度约为地表以下3 m处,位于粉质粘土层中。此外,桩底以下土体也会产生一定的水平位移,距离桩底越远,位移实测值越小;当C1和C2完工时,实测水平位移随深度的变化趋势与单桩(C1)施工情况的变化趋势基本一致,也呈现出近似先增大后减小的规律,最大值达到72 mm左右,最大值的发生深度也位于粉质粘土层中。此外,桩底以下的实测水平位移比单桩施工引起的水平位移要大,变化规律类似,距离桩底越远,实测水平位移越小。

(2)Chai方法可以应用于计算单根水泥搅拌桩施工的情况,而对于多桩施工的情况,由于其无法考虑施工顺序的影响,产生的计算误差也将逐渐变大。Chai方法只能计算对应于桩身侧边土体的水平位移,而无法计算桩底以下(或桩顶以上)土体的水平位移。

(3)分析表明,以水平位移不超过10 mm作为施工时的安全控制值,则单根水泥搅拌桩施工对周围环境的影响范围约为9 m。水泥搅拌桩施工的影响范围远小于预制桩施工的影响范围。未来可以结合考虑球形圆孔扩张理论与叠加理论以提出更接近现场实际的分析方法。

参考文献:

References:

[1] 邱青长,莫海鸿,董志良,等. 水泥搅拌桩和砂桩在真空预压防护工程中应用与分析[J]. 岩土工程学报, 2007,29(1):143-146.

QIU Qing-chang, MO Hai-hong, DONG Zhi-liang, et al. Analysis and Application of Cement-mixed Piles and Sand Piles to Protection Projects of Soft Ground Improved by Vacuum Preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(1):143-146.

[2] 李国维,姜微,吴玉财,等. 预置管法静力触探检测水泥搅拌桩现场试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7):1289-1296.

LI Guo-wei, JIANG Wei, WU Yu-cai, et al. Field Tests on Detecting Cement Mixing Piles by Static Cone Penetration Tests in Reserved Hole[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1289-1296.

[3] MODONI G, BZOWKA J. Analysis of Foundation Reinforced with Jet Grouting[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(12): 1442-1454.

[4] 韩红. 水泥搅拌桩在高速公路软基加固中的应用

[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(12): 57-60.

HAN Hong. Application of Cement Mixing Pile in Reinforcement of Soft Foundation of Expressway[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(12): 57-60.

[5] 张宏博,厉超,宋修广,等. 饱和粉土地基低强度混凝土桩振动沉管及静载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(4): 60-65.

ZHANG Hong-bo, LI Chao, SONG Xiu-guang, et al. Vibration Pipe Sinking and Static Load Test of Low-strength Concrete Pile in Saturated Silt Soil Foundation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(4): 60-65.

[6] 邓祥辉,张永杰,房海勃. 后压浆钻孔灌注桩承载力分析与试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 58-64.

DENG Xiang-hui, ZHANG Yong-jie, FANG Hai-bo. Bearing Capacity Analysis and Experiment Research on Post-grouting Bored Piles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 58-64.

[7] 王晓平,朱海涛,李忠献,等. 天津滨海新区典型软土地基强夯法有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 105-111.

WANG Xiao-ping, ZHU Hai-tao, LI Zhong-xian, et al. Finite Element Analysis of Dynamic Consolidation Method on Typical Soft-soil Foundation in Tianjin Binhai New Area[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 105-111.

[8] 於慧,丁选明,刘汉龙,等. 路堤荷载下现浇X形桩复合地基承载特性数值分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 87-94.

YU Hui, DING Xuan-ming, LIU Han-long, et al. Numerical Analysis on Bearing Performance of Cast-in-place X-section Pile Composite Foundation Under Road Embankment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 87-94.

[9] 孙宪春. 水泥深层搅拌桩的设计及施工方法技术要点[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(10): 63-65.

SUN Xian-chun. Technical Points for Design and Construction of Cement Deep Mixing Pile[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(10): 63-65.

[10] YBJ 225—91, 软土地基深层搅拌加固法技术规程[S].

YBJ 225—91, Technical Specification for Deep Mixing Technique to Consolidate Soft Soils[S].

[11] SHEN S L, XU Y S, HAN J, et al. State of the Practice of Grouting and Deep Mixing in China — A Re-

- cent Ten-year Review[C]//ASCE. Grouting and Deep Mixing 2012. New Orleans:ASCE,2012:343-356.
- [12] 郑 刚,王长祥,顾晓鲁.软土中超长水泥搅拌桩复合地基承载力研究[J].岩土工程学报,2002,24(6):675-679.
- ZHENG Gang, WANG Chang-xiang, GU Xiao-lu. Bearing Capacity of Composite Foundation with Long Cement Treated Column in Soft Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 675-679.
- [13] 马克生,梁仁旺,白晓红.水泥搅拌桩复合地基承载力的试验确定[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2652-2654.
- MA Ke-sheng, LIANG Ren-wang, BAI Xiao-hong. Determination of Bearing Capacity of Deep Cement Mixing Composite Foundation by Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2652-2654.
- [14] 马洪友,刘 林.水泥搅拌桩复合地基承载力研究[J].公路,2013(2):50-53.
- MA Hong-you, LIU Lin. Bearing Capacity of Deep Cement Mixing Composite Foundation[J]. Highway, 2013(2):50-53.
- [15] 闫 超,刘松玉,邓永锋,等.加筋水泥搅拌桩水平承载力试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(增2):730-734.
- YAN Chao, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, et al. Experimental Study on Horizontal Bearing Capacity of Reinforced Cement-Soil Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):730-734.
- [16] 胡贺松,彭振斌,杨 坪,等.软土水泥搅拌桩复合地基沉降特性试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(3):803-807.
- HU He-song, PENG Zhen-bin, YANG Ping, et al. Settlement Characteristic of Composite Foundation for Cement Mixing Piles in Soft Soil[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(3):803-807.
- [17] 沈一帆,胡敏云,计国贤.基坑水泥搅拌桩桩身水平位移影响因素的颗粒流数值模拟[J].浙江工业大学学报,2011,39(3):273-278.
- SHEN Yi-fan, HU Min-yun, JI Guo-xian. Numerical Simulation of Granular Flow on Factors for the Horizontal Displacement of Cement Mixing Pile in the Foundation Pit[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 39(3):273-278.
- [18] SHEN S L, MIURA N, KOGA H. Interaction Mechanism Between Deep Mixing Column and Surrounding Clay During Installation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2):293-307.
- [19] 沈水龙,蔡丰锡,顾伟华.有明黏土中搅拌桩施工时的孔隙水压力[J].岩土力学,2006,27(4):648-652.
- SHEN Shui-long, CAI Feng-xi, GU Wei-hua. Excess Pore Pressure Around Deep Mixing Column in Soft Ariake Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4):648-652.
- [20] 关云飞,赵维炳,俞 缙.水泥搅拌桩施工引起的超孔隙水压力[J].固体力学学报,2008,29(增1):122-126.
- GUAN Yun-fei, ZHAO Wei-bing, YU Jin. Excess Pore Water Pressure Around Deep Mixing Column in Soft Clay[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(S1):122-126.
- [21] VESIC A S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1972, 98(3):265-290.
- [22] CHAI J C, MIURA N, KOGA H. Lateral Displacement of Ground Caused by Soil-cement Columns Installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5):623-632.
- [23] SHEN S L, DU Y J, LUO C Y. Evaluation of the Effect of Rolling Correction of Double-O-tunnel Shields via One-side Loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(10):1060-1070.
- [24] SHEN S L, XU Y S. Numerical Evaluation of Land Subsidence Induced by Groundwater Pumping in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(9):1378-1392.
- [25] CHAI J C, MIURA N, KOGA H. Closure to "Lateral Displacement of Ground Caused by Soil-cement Columns Installation" by Jin-chun CHai, Norihiko Miura, and Hirofumi Koga[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1):124-126.
- [26] WANG Z F, SHEN S L, HO C E, et al. Investigation of Field Installation Effects of Horizontal Twin-jet Grouting in Shanghai Soft Soil Deposits[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(3):288-297.