

素混凝土桩复合地基在深厚软土地基处理中的应用

高明军^{1,2}, 左威龙^{1,2}, 李净一³, 沈文纲⁴

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 温州市绕城高速公路工程建设指挥部, 浙江 温州 325102; 4. 浙江省交通工程建设集团有限公司, 浙江 杭州 310013)

摘要 针对素混凝土桩在施工中振动沉管及回旋钻机成孔施工工艺的不足之处, 采用了回旋切土工艺成孔的素混凝土桩. 阐述了该工艺施工步骤及注意事项, 分析了其优势及不足, 并介绍了素混凝土桩复合地基加固深厚软土地基时采用的沉降控制的设计计算方法. 结合静载荷试验以及现场表面沉降监测, 验证了回旋切土工艺成孔的素混凝土桩复合地基加固深厚软土地基的效果, 表明对该类工程地质软土地基处理具有一定的参考价值.

关键词 素混凝土桩 回旋切土 复合地基 静载荷试验

中图分类号 : TU473.1 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2008)01-0067-04

20 世纪 80 年代以来我国土木工程基础建设发展迅速, 有很大一部基础设施是建在不良地基上, 当天然地基不能满足上部结构物承载力或沉降要求时, 需要进行地基处理或采用桩基础. 复合地基是地基处理中广为应用的方法之一, 复合地基^[1]是指天然土体在地基处理过程中部分土体得到增强、被置换或在天然土体中设置加筋材料, 由天然土体和增强体两部分组成的人工地基.

我国在 20 世纪 70 年代就利用碎石桩加固地基, 在砂土、粉土中消除地基液化和提高地基承载力等方面, 取得了令人满意的效果. 但是在塑性指数较大、挤密效果不明显的黏性土中, 承载力提高幅度不大. 碎石桩是散体材料, 本身没有黏结强度, 主要靠周围土体的约束传递基础传来的垂直荷载. 土越软对桩的约束作用越差, 桩传递垂直荷载的能力越弱. 刚性桩与碎石桩不同, 一般情况下不仅可全桩长发挥桩的侧阻, 桩端落在好的持力层也可很好地发挥端阻作用^[2].

素混凝土桩就是在碎石桩中加入适量的中砂、水泥和水将其搅拌, 形成一种黏结度较高的刚性桩体. 素混凝土刚性桩复合地基提高承载能力幅度大(一般能使地基承载力提高 50 % ~ 100 %), 变形模量高. 通过改变桩长、桩径、桩距、桩身强度、垫层厚度等设计参数, 承载能力提高幅度有较大的可调性. 素混凝土桩与 CFG 桩在受力和变形特性方面非常相似, 但桩体材料的构成不同.

1 素混凝土桩复合地基工作机理

CFG 桩复合地基是目前工程中应用比较广泛的一种桩基, 桩体材料由碎石、石屑、粉煤灰及适量水泥加水搅拌胶结而成^[3]. 在粉煤灰不丰富的情况下, 工程中常用的是桩体材料为水泥、碎石、中砂组成的素混凝土桩. 根据不同的配合比, 素混凝土桩桩身混凝土强度可从 C5 到 C20 调节.

同 CFG 桩一样, 素混凝土桩都具有一定强度, 为刚性桩, 工作性状和属于散体材料桩的碎石桩有很大不同, 不需要周围土体的约束作用就可以将竖向荷载传递到深层土层或者持力层上.

在上部荷载作用下, 素混凝土桩压缩变形小于周围土体的变形, 桩身分别向褥垫层和下卧层刺入, 桩土共同承担荷载, 并且在褥垫层的变形调解下荷载逐渐向桩顶转移(图 1), 有效降低了复合地基的总体沉降^[4-5]. 根据复合地基载荷试验中测试的桩土应力比^[6], 桩体的承载作用显著.

2 素混凝土桩施工工艺及特点

2.1 成孔工艺的选择

目前常用的素混凝土桩施工工艺主要有 2 种：(a) 振动沉管后灌注混凝土，为避免施工扰动影响已成桩质量，需有一定桩间距或采用隔行跳打的方法，对周围环境扰动较大^[7]。(b) 采用回旋钻机成孔，洗孔后加入搅拌好的混凝土粒料。这种方法能打设较深的深度，能穿过坚硬土层及薄层密砂，但施工泥浆量大，泥浆外运增加施工成本，影响施工速度。这两种施工工艺各有优缺点，针对深厚软土地基，在实际工程中采用了回旋切土工艺成孔的素混凝土桩，相对振动沉管及回旋钻机成孔，回旋切土工艺成孔具有以下优点：

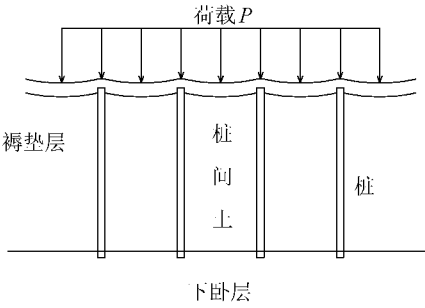


图 1 素混凝土桩复合地基工作性状示意图
Fig.1 Sketch of working performance of plain concrete pile composite foundation

- a. 施工机械小，操作简单，便于管理。施工振动小，对相邻桩桩身影响小，不必考虑施工桩与已灌注桩间距及时间间隔问题，施工方便快捷。
- b. 无需洗孔，减少了泥浆外排，只需将少量的与桩身同体积的地基土外运即可，降低了施工成本。
- c. 施工速度快，无冲孔、洗孔等工序，成孔后只需扫孔、清桩底沉渣即可灌注混凝土。
- d. 施工时无施工泥浆，节约水电等资源，避免了施工泥浆的二次污染。

2.2 施工工艺

回旋切土工艺成孔的素混凝土桩适合于软弱土层，钻机深度小于 30 m。对加固深度内存在易塌孔砂土层情况或者难以钻进的坚硬土层，选择回旋切土工艺成孔要慎重。回旋切土工艺成孔施工工艺如下：

- a. 根据桩径、桩长及地基土情况选择适当的桩机型号。
- b. 放样定好桩位，钻进成孔。一般应先慢后快，在钻进过程中，如发现钻杆摇晃剧烈，应放慢进尺。
- c. 混凝土搅拌上料顺序为 碎石→水泥→砂，碎石最大粒径应小于 5 cm，含泥量控制在 5% 以内，每盘混凝土搅拌时间不少于 60 s，坍落度控制在 16~20 cm。
- d. 钻进到设计桩长后，来回提几次钻杆扫孔，清过桩底沉渣后开始泵送混凝土。混凝土灌注量应按桩身体积乘以充盈系数来控制。
- e. 泵送混凝土结束后，如桩顶面低于设计标高，应立即补充混凝土到高于设计标高 0.5 m，并振捣密实。
- f. 确认成桩符合设计要求后，盖好顶，移机至下一根桩继续施工。

2.3 素混凝土桩复合地基特点

可根据加固区及下卧层土层结构经济合理地选择桩端持力层。通过褥垫层的调解作用及桩的刺入作用，桩土共同分担上部荷载，充分利用了土的天然承载作用，可提高地基承载力和减少沉降。

3 素混凝土桩复合地基设计计算方法

采用素混凝土桩复合地基技术可以提高地基承载力，减小地基沉降。在深厚软土地基上应用该技术具有良好的经济效益和社会效益。在深厚软弱地基上的建筑物沉降比较大，当处理后沉降变形能满足要求时，承载力一般能满足要求。因此，素混凝土桩复合地基加固深厚软弱地基时采用沉降控制的设计计算方法。

在荷载作用下复合地基的总沉降量 s 包含两部分（褥垫层的变形很小，可以忽略不计）加固区压缩量 s_1 ，下卧层压缩量 s_2 。

$$s = s_1 + s_2 \tag{1}$$

目前复合地基的沉降实用计算方法中，对下卧层压缩量 s_2 一般采用分层总和法来计算，而对加固区压缩量 s_1 的计算方法正在不断发展和完善之中，不同的工程情况和桩型应采用不同的计算公式。关于加固区的压缩量计算方法有应力修正法、桩身压缩法、复合模量法等。桩身压缩法是假定桩体不发生上下刺入而通过桩身的压缩量来计算加固区的变形，一般使用于柔性桩或下卧层刚度比较大的情况，显然素混凝土桩复合地基处理深厚软土地基采用这种方法不合适。应力修正法计算公式中的桩土应力比与桩土相对刚度、荷载大小及施压方式、置换率、褥垫层及下卧层物理力学性质等因素有关，不易合理取值，尤其是对于桩土相对刚度较大的高黏结强度桩， n 在 15~40 之间，是一个变化值。素混凝土桩复合地基处理深厚软土地基设计时采用

较为简单易行的复合模量法计算,该方法将复合地基加固区中桩体和原地基土两部分看作一个整体——复合土体,采用复合压缩模量来表述复合土体的压缩性,将加固区土层分成 n 层,采用分层总和法计算.加固区压缩量 s_1 为

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_{csi}} H_i$$

(2)

式中 ΔP_i ——加固区中第 i 层复合土体上附加应力增量; E_{csi} ——第 i 层复合土体的复合模量; H_i ——第 i 层复合土体的厚度.

复合土体的压缩模量 E_{cs} 采用面积加权平均法来计算:

$$E_{cs} = mE_p + (1 - m)E_s$$

(3)

其中

$$m = \frac{s_p}{s_{sp}}$$

(4)

式中 E_{cs} ——复合土体压缩模量; E_p ——桩体压缩模量; E_s ——桩间土压缩模量; m ——复合地基置换率; s_p ——桩体横截面积; s_{sp} ——单桩控制面积.

下卧层压缩量 s_2 常采用分层总和法计算,而作用在下卧层上的荷载是难以准确计算的.目前在工程上常采用应力扩散法、等效实体法、改进 Geddes 法等计算应力.应力扩散法中的扩散角较难确定,改进的 Geddes 法计算复杂且荷载分担比以及桩侧摩阻力分布不易准确确定^[8].素混凝土桩复合地基处理深厚软土地基设计时采用了等效实体法计算.对于平面应变情况,计算公式为

$$p_b = p - \frac{2hf}{B}$$

(5)

式中 p_b ——下卧层上的荷载密度; p ——复合地基上的荷载密度; h ——加固区厚度; B ——荷载作用面宽度; f ——等效实体四周侧摩阻力密度.加固区的侧摩阻力不易确定,计算时可根据当地工程经验确定, f 按各土层地质报告中桩侧土极限摩阻力的一半计算.从计算值与试桩试验结果来看,采用复合模量法有一定的可靠性.

素混凝土桩的复合地基承载力计算方法与其他刚性桩或柔性桩复合地基承载力计算方法基本相同,这方面的研究相对比较成熟和简单,其计算公式可以参考文献^[8].

4 工程实例及加固效果检测

4.1 工程概况

国道主干线宁波绕城高速公路(西段)从骆驼至姜山,该高速公路沿途软土层厚变化大,具有含水率大、有机质含量高、抗剪强度低、高压缩等不良特性.为防止桥头路段沉降特别是工后沉降过大,部分桥头路段选用素混凝土桩复合地基来处理桥头软土地基.本文选择研究的路段为 K26 + 316 ~ K26 + 358,该路段软土

表 1 场地地基土物理力学性质指标

Table 1 Physical-mechanical indexes of field soil

土层名称	层厚/m	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_s/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
杂填土	1.5				
亚黏土	1.6	1780	4.2	16	5.6
淤泥质亚黏土	12	1680	2	12	2
砂砾层	> 8.5				

层厚 28 m,设计填土高度为 4.5 m.据钻孔和静探孔资料,结合岩土物理力学试验成果,场地地基土的物理力学性质指标见表 1.

根据地层资料及上部荷载情况,该软基处理段具体参数为:素混凝土桩直径 50 cm,混凝土标号 C20,梅花型布桩桩间距 2.5 m,褥垫层厚度 50 cm,复合地基承载力要求达到 92.1 kPa.

4.2 单桩静载荷试验

为了检验该桩在此类地基加固中的效果,在龄期满 28 d 后于现场进行了单桩静载荷试验.在整个试验过程中,各级荷载作用下沉降增量处于 0.62 ~ 23.5 mm 之间,试验结束时总沉降量 47.5 mm.试验结果绘制成荷载-沉降曲线(图 2).从图 2 中可看出该桩荷载-沉降曲线呈陡降型,尾部出现下折趋势.据 JGJ 94—94《建筑桩基技术规范》,该桩极限承载力取值为 482.1 kN,

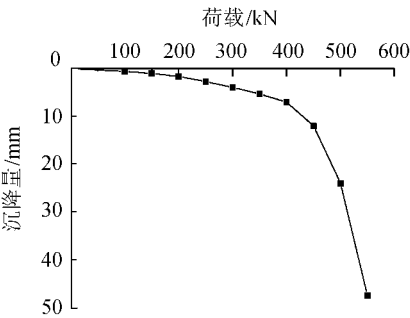


图 2 静载荷试验荷载-沉降曲线

Fig.2 Load-settlement curve from static load tests

能够满足上部荷载承载要求.

4.3 软土地基表面沉降监测

图3为典型的表面沉降过程线,表面沉降随着填土高度的增加,沉降量相应增大,沉降过程线存在几个较明显的拐点.路堤填筑初期沉降较小,沉降发生的速率较慢,当填土2.5 m左右时,沉降速率有增大的趋势.填土完成6个月后,沉降基本稳定,说明沉降主要发生在施工期,工后沉降只占极小部分,完全能达到工程使用要求.目前地基总沉降量24.1 cm.

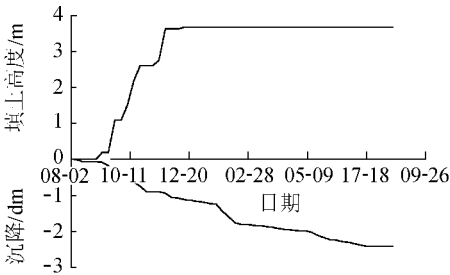


图3 填土-沉降监测曲线

Fig.3 Earth filling-settlement monitoring curve

5 结 语

采用回旋切土工艺成孔的素混凝土桩复合地基处理深厚软土地基,技术简单可行,施工方便快捷,造价低,能取得较好的加固效果,是一种比较适合的方法.本文介绍了回旋切土成孔的一般施工工艺及其特点、设计方法,并结合静载荷试验以及现场表面沉降监测,验证了采用回旋切土工艺成孔的素混凝土桩加固深厚软土地基的效果,对以后的软土地基处理有一定的参考价值.

参考文献:

[1] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000.
[2] 龚晓南.地基处理技术及其发展[J].土木工程学报,1997,30(6):3-11.
[3] 阎明礼,张东岗.CFG桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
[4] 杨军,闫明礼,唐建中,等.褥垫层在复合地基中的应用[J].建筑科学,1991(2):45-49.
[5] 池跃君,宋二样,金淮,等.素混凝土桩复合地基荷载传递机理的试验研究[J].工业建筑,2001,31(4):39-42.
[6] 梁沙河,刘艳,朱筱俊,等.低强度等级素混凝土桩地基处理法及其在工程中的应用[J].工业建筑,2005,35(增刊):582-586.
[7] 宋法宝,陈永辉,刘汉龙.低标号混凝土桩在杭金衢高速公路中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(5):583-586.
[8] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.

Application of plain concrete piles to treatment of deep and thick soft soil foundation

GAO Ming-jun^{1,2}, ZUO Wei-long^{1,2}, LI Jing-yi³, SHEN Wen-gang⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;

3. Wenzhou Round-the-City Expressway Construction Headquarters, Wenzhou 325102, China ;

4. Zhejiang Traffic Engineering Construction Group Co. Ltd., Hangzhou 310013, China)

Abstract In consideration of some disadvantages in the conventional boring technology, i. e. the vibro-pipe sinking technology and rotary drill technology, in plain concrete pile construction, the rotary ground-penetrating boring technology was employed in plain concrete pile construction for deep and thick soft soil foundation treatment. The steps and some cautions of the construction technology as well as its characteristics were expounded, and the calculation method for settlement control design in construction was introduced. Then, the effect of the rotary ground-penetrating boring technology was verified by static load tests and surface settlement monitoring, and the result is of certain reference value to the similar projects.

Key words plain concrete pile ; rotary ground-penetrating ; composite foundation ; static load test