

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.06.012

【工程应用】

# 超薄型 PCC 桩在滩涂超软土地基处理工程中的实践

李伟<sup>1</sup>, 隋欣<sup>2</sup>, 李卫国<sup>3</sup>, 金小荣<sup>2</sup>, 莫立成<sup>2</sup>, 朱建才<sup>2</sup>

(1. 方远建设集团股份有限公司, 浙江 台州 317700; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000;  
3. 台州市社会发展工程管理有限公司, 浙江 台州 318000)

**摘要:** 以地基承载力约为 50 kPa 的台州集聚区某学校项目为工程背景, 使用壁厚仅为 80 mm 的超薄型 PCC 桩在超软土中进行地基加固。通过对超薄型 PCC 桩进行单桩竖向静载试验和单桩复合地基静载试验, 并结合现场开挖情况与实测数据研究其在滩涂超软土地基中的加固效果。试验结果表明, 超薄型 PCC 桩在滩涂超软土中具有成桩质量可靠、单桩承载力高、施工速度快、节约混凝土用量的优点。超薄型 PCC 桩复合地基承载力与沉降均可满足地基加固要求, 具有经济优越性。基于现场试验数据, 利用 ABAQUS 对超薄型 PCC 桩进行三维有限元数值模拟, 揭示了摩阻力分布等无法通过静载试验得到的结果。在竖向荷载作用下, 超薄型 PCC 桩的上部与下部侧摩阻力异步发挥, 沉降初始阶段超薄型 PCC 桩的上部侧摩阻力发挥, 随后桩下部的侧摩阻力以及桩端阻力相继发挥, 且桩侧摩阻力先于桩端阻力达到极限状态; 桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担。

**关键词:** 超薄型 PCC 桩; 超软土; 地基处理; ABAQUS; 复合地基承载力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0618-08

## Application of ultra-thin PCC pile in tidal ultra-soft soil foundation treatment project

LI Wei<sup>1</sup>, SUI Xin<sup>2</sup>, LI Weiguo<sup>3</sup>, JIN Xiaorong<sup>2</sup>, MO Licheng<sup>2</sup>, ZHU Jiancai<sup>2</sup>

(1. Fangyuan Construction Group Co., Ltd., Taizhou 317700, Zhejiang, China;

2. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

3. Taizhou Social Development Engineering Management Co., Ltd., Taizhou 318000, Zhejiang, China)

**Abstract:** Based on a school project in Taizhou with a foundation bearing capacity of 50 kPa, the ultra-thin PCC pile with a wall thickness of only 80 mm was used for foundation reinforcement in ultra-soft soil. The static load test of single pile and the static load test of single pile composite foundation were carried out on the ultra-thin PCC pile, and the reinforcement effect on the tidal ultra-soft soil foundation was studied by combining the field excavation conditions with measured data. The test results show that ultra-thin PCC pile has advantages of reliable pile formation quality, high bearing capacity, fast construction speed and saving concrete consumption in tidal ultra-soft soil. The bearing capacity and settlement of ultra-thin PCC pile composite foundation can meet the requirements of foundation reinforcement and it is more economical. Based on the field test data, ABAQUS was used to perform 3D finite element numerical simulation of ultra-thin PCC pile, revealing results such as friction resistance distribution which cannot be obtained by static load test. Under vertical load, the upper and lower lateral frictional resistance of ultra-thin PCC piles are asynchronously exerted. At the initial stage of settlement, the lateral friction resistance of the upper part of ultra-thin PCC pile plays an effective role, and then the lateral friction resistance of the lower part of the pile and the tip resistance play an effective role successively. The pile side friction resistance reaches the limit state earlier than the pile tip does. The pile top load is mainly borne by pile side friction.

**Key words:** ultra-thin PCC pile; ultra-soft soil; foundation treatment; ABAQUS; bearing capacity of composite foundation

收稿日期: 2024-04-15

作者简介: 李伟 (1982—), 男, 浙江台州人, 本科, 高级工程师, 主要从事建筑施工工作。E-mail: 397332756@qq.com。

## 0 引言

随着我国“海洋经济”战略的提出和沿海地区发展圈的不断扩大,沿海地区的建设用地难以满足日益增长的海洋产业经济发展需要,滩涂开发利用、填海造陆是解决这一问题的有效手段之一。我国天津、江苏、浙江、广东等沿海城市和省份响应国家发展蓝色经济的号召,大力开发利用滩涂资源<sup>[1]</sup>。超软土微观结构的高孔隙比特性直接决定了超软土的渗透、变形和固结特性不同于一般软土地基<sup>[2]</sup>,超软土地基处理成为制约滩涂地区大面积开发利用的最大瓶颈。

现浇混凝土大直径管桩(Cast-in-Place Concrete Large-Diameter Pipe Pile, 以下均简称 PCC 桩)是在沉管灌注桩基础上改进的一种可实现自动排土、振动灌注而成的筒状管桩,其较好地解决了桩底沉渣、桩侧泥皮以及水下混凝土灌注桩质量难以保证等问题。PCC 桩因具有成桩速度快、挤土效应弱、地面隆起小、节省混凝土用量和承载力高的优点,发展至今已广泛应用于交通工程、堤防建设、工业与民用建筑工程、基坑围护及地基处理工程<sup>[3-4]</sup>,并取得显著的工程效果与经济效益。

目前,国内学者对于 PCC 桩的研究多针对于软黏土及一般软基。国道主干线广州绕城公路九江至小塘段分别采用 PCC 桩复合地基与 CFG 桩复合地基,实施效果显示 PCC 桩复合地基沉降量和沉降速率均小于 CFG 桩复合地基,PCC 桩复合地基的加固处理效果更好<sup>[5]</sup>。乐清市旭阳路路段采用 PCC 桩复合地基有效解决了路桥结合不均匀沉降问题,工期节约近 1/3<sup>[6]</sup>。温州半岛围垦工程中采用 PCC 桩复合地基,薄壁管桩承载力与工后沉降均能满足工程地基加固要求,与钻孔灌注桩方案相比节约混凝土用量约 40%,工程造价节省约 30%<sup>[7]</sup>。宁波某市政工程分别采用 PCC 桩与高压旋喷桩进行软基处理,现场复合地基承载力检测试验与桩身强度检测结果显示,为达到相同的加固效果,单位面积 PCC 桩加固单价仅为高压旋喷桩加固单价的 34%<sup>[8]</sup>。PCC 桩在滩涂超软土中应用的工程与研究

较少,制约了 PCC 桩技术在滩涂超软土地基处理中的应用与推广。

此外,在市政、交通、建筑等工程<sup>[3-8]</sup>中进行应用与研究的 PCC 桩壁厚均为 120~150 mm,对于壁厚更小的超薄型 PCC 桩的应用与研究极少。金小荣等<sup>[9]</sup>基于 PC 工法桩对 PCC 桩的装置进行了改进,首次在吹填土中使用了壁厚仅为 90 mm 的超薄型 PCC 桩进行地基处理,施工后的地基加固效果经检验可达到设计要求。与灌注桩相比,PCC 桩最明显的优势是在承载力和沉降满足设计要求的前提下节约了混凝土的用量。超薄型 PCC 桩的应用与研究不仅有利于 PCC 桩的发展,更符合绿色工程的时代背景。

本文以台州集聚区某学校项目为依托,在地表土承载力特征值约为 50 kPa 的场地上采用超薄型 PCC 桩地基加固方法,研究超薄型 PCC 桩在滩涂超软土中的加固效果。基于现场试验实测结果,通过建立 ABAQUS 三维有限元模型对超薄型 PCC 桩的荷载传递机理进行进一步分析和研究,研究成果可以为类似工程提供参考。

## 1 工程概况及试验场地工程地质条件

台州某学校项目位于台州湾集聚区东部新区,拟建项目为实训楼、图书馆、学生宿舍及田径场等,其中田径场为本次地基加固试验范围,占地面积约为 18 385.48 m<sup>2</sup>。

场地属于沿海海涂地貌,原始地面标高为 1985 国家高程 0.00 m 左右。表部人工吹填淤泥经过真空预压固结处理,呈软塑状,底部呈流塑状,物理力学性质差。局部厚度超过 3.00 m,地形平坦开阔,经真空预压固结处理后,现状地面高程为绝对高程 2.80~2.10 m。主体结构设计要求地基处理后的复合地基承载力不得小于 60 kPa。

根据本工程地质勘察报告(详细勘察),场地表部吹填土以下地基土纵向上物理力学性质由差至好逐渐过渡,横向上各土层顶板起伏不大,地基土均匀性较好。工程所在场地地基土物理力学设计参数见表 1,典型地质剖面如图 1 所示。

表 1 地基土物理力学设计参数表

Table 1 Physical and mechanical design parameters of the foundation soil layers

层号	名称	含水量 w/%	重度 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )	固结快剪		承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa	压缩模量 $E_{1-2}$ /kPa
				黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )		
①-1	吹填土	42.7	17.9	16.1	9.4	45	2.92

续表

层号	名称	含水量 w/%	重度 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )	固结快剪		承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa	压缩模量 $E_{1-2}$ /kPa
				黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)		
②-1	淤泥质粉质黏土	43.9	17.6	15.7	9.2	55	2.94
②-2	淤泥质黏土	50.8	17.2	14.7	8.3	50	2.39
②-3	淤泥	53.7	16.9	14.5	8.1	45	3.21
③-1	粉质黏土	30.9	19.1	32.2	15.7	150	5.60
③-2	黏土	37.6	18.1	21.8	8.2	110	3.68
④-1	粉质黏土	29.5	19.4	30.5	16.4	170	6.06
④-2	粉质黏土	33.5	18.7	26.2	15.1	140	5.14
④-3	粉土	28.7	19.3	21.5	19.9	145	8.30
⑤-1	粉质黏土	28.4	19.5	34.9	16.4	180	6.26
⑤-2	粉质黏土	28.9	19.3	26.2	18.4	150	7.14

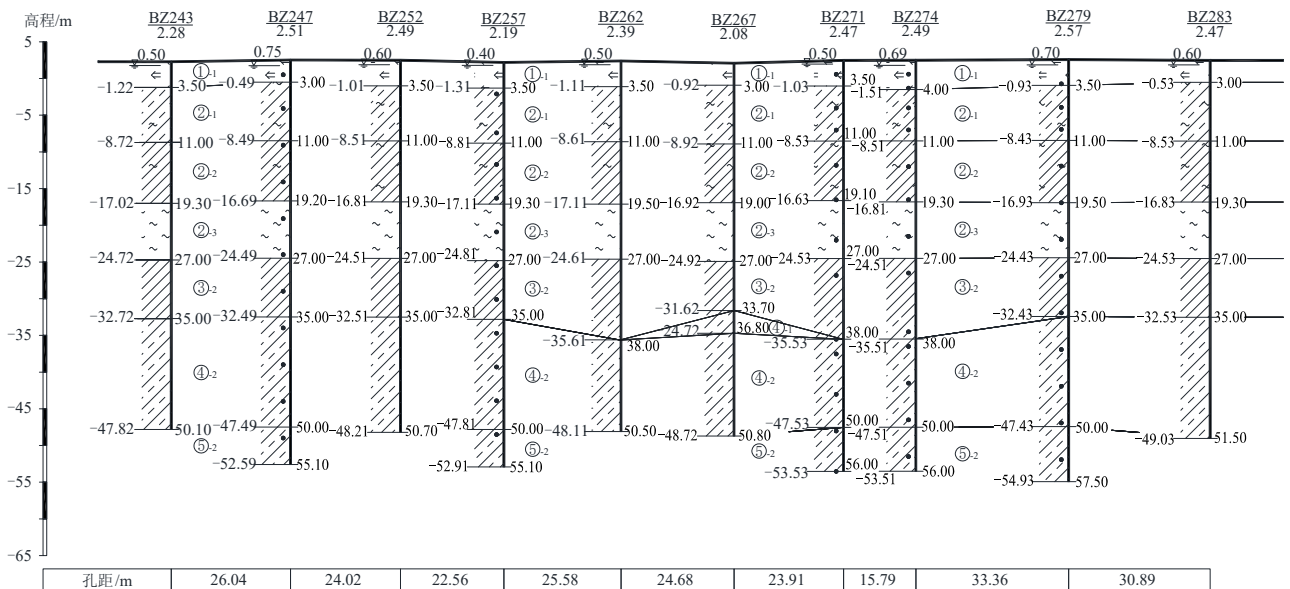


图1 典型地质剖面图

Fig. 1 Profile of typical geology

## 2 地基处理方案

### 2.1 地基处理方案比选

场地地表部地基土为吹填土，性质差，表部土层虽经真空预压固结处理后呈软塑状，但后期桩基施工时大型机械设备易下陷，不利于施工的安全性。结合台州地区的地质资料与设计的要求，对①-1、②-1与②-2层土进行适当处理，使之适宜本工程。本项目可采用水泥搅拌桩、预应力管桩和超薄型PCC桩进行地基处理，现对3种方案进行经济和技术比较。

#### (1) 水泥搅拌桩加固

水泥搅拌桩具有技术成熟、施工难度小、价格相对较低的优点，但是在淤泥质土中经常出现钻头喷嘴口堵塞的问题，施工机械送浆压力的不稳定也容

易导致搅拌不均匀，充盈系数较大。由于其施工工艺特点，加固效果呈层状特性，沿桩体纵向均匀性差，易造成不均匀沉降。

#### (2) 预应力管桩加固

预应力管桩质量可靠，可实现静压施工，施工方便，但预应力管桩具有明显的挤土效应，深厚软基中易出现桩基偏位、上浮的问题，截桩率高。此外，预应力管桩的单桩承载力较低，布桩较为密集，价格较高。

#### (3) 超薄型PCC桩加固

超薄型PCC桩为刚性弱挤土桩，施工依靠振动压入，对施工机械要求不高，沉桩时阻力小，施工速度快。沉桩时，多余的土可以从环形套管内侧自动排出，在软土地区可减小地面隆起。与传统钻孔

灌注桩相比, 超薄型 PCC 桩由于其环形结构更节约混凝土用量, 成桩质量好, 承载力高, 在桩端进入持力层的条件下, 超薄型 PCC 桩复合地基承载力可达水泥搅拌桩的 10 倍<sup>[10]</sup>。

### 2.2 本项目地基处理方案

综合考虑施工工期、环境保护及经济性, 最终选择超薄型 PCC 桩加固方案。超薄型 PCC 桩外径为 900 mm, 壁厚为 80 mm。桩身采用 C15 混凝土, 正方形布置, 桩间距为 3.0 m。桩顶下设 50 cm 厚的 C15 混凝土封口。桩顶设 40 cm 厚的碎石垫层, 碎石垫层内设 2 层双向土工格栅。本项目地表下为深厚软土, ②<sub>1</sub>、②<sub>2</sub> 与 ②<sub>3</sub> 土层的岩土力学参数差异性较小, 超薄型 PCC 桩属于摩擦桩, 综合考虑工程造价与技术要求, 本项目采用的桩长为 8.0~10.0 m, 桩底进入 ②<sub>2</sub> 层土。超薄型 PCC 桩构造设计断面图如图 2 所示。

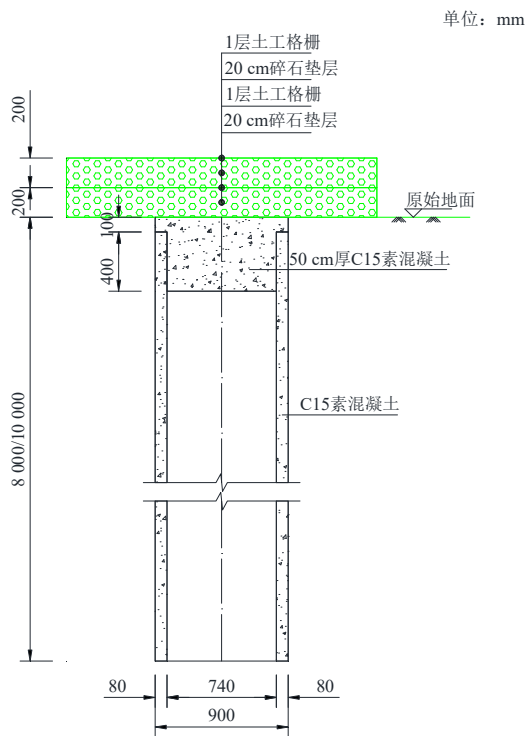


图 2 超薄型 PCC 桩构造设计断面图

Fig. 2 Sectional view of ultra-thin PCC pile structure design

本项目采用金小荣等<sup>[9]</sup>设计的 PCC 桩装置进行施工, 施工工序为: (1) 场地整平; (2) 成桩; (3) 清除桩头杂土和浮浆, 并冲洗干净; (4) 填一半厚褥垫层并压实; (5) 铺设土工格栅; (6) 再填一半厚褥垫层并压实; (7) 施工地坪。根据工程项目实测, 利用该装置成桩, 5 min 可将一根长 10.0 m 的桩打至设计标高, 15 min 可完成一根超薄型 PCC 桩的打入、灌注混凝土及拔桩工序, 成桩速度快, 效率高。

## 3 地基加固效果

桩身质量与桩基承载力密切相关, 有别于一般的现浇类桩基, 超薄型 PCC 桩在初凝后可通过开挖桩芯土的方式直接检查管桩的壁厚和成桩情况, 桩芯土挖除后, 采用桩身同强度等级的素混凝土回灌, 保证桩头质量并可减少上部垫层之间的应力集中。图 3 和图 4 分别为初凝后超薄型 PCC 桩现场开挖照片与素混凝土封口完成后的照片。



图 3 超薄型 PCC 桩现场开挖照片

Fig. 3 Photo of ultra-thin PCC pile excavation site



图 4 素混凝土封口完成后的照片

Fig. 4 Photo of plain concrete after sealing

除现场开挖检测外, 成桩 28 d 后应根据《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T 213—2010)<sup>[11]</sup> 规定进行单桩和单桩复合地基静载试验, 以保证超薄型 PCC 桩可达到设计要求。

### 3.1 静载试验概况

单桩竖向静载试验采用钢梁和混凝土预制块组成的反力装置, 利用 200 t 液压千斤顶进行分级加压, 加卸载方式和终止加载要求遵循《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)<sup>[12]</sup> 规定。试验过程中采用快速维持荷载法, 利用 RS-JYC 桩基静载荷测试分析检测系统对超薄型 PCC 桩的单桩竖向静载试验进行监控量测。

单桩复合地基静载试验采用慢速维持荷载法, 压板尺寸为 3.0 m×3.0 m, 试验加载设备、加卸载方

式、荷载与沉降量测按照《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)<sup>[13]</sup>规定,成桩28 d后静载试验现场照片如图5所示。



图5 静载试验现场照片

Fig. 5 Field photo of static load test

### 3.2 试验结果

图6为由单桩竖向静载试验结果<sup>[14]</sup>绘制而成的荷载-沉降( $Q-S$ )曲线图。由图6可知, $Q-S$ 曲线平缓光滑,无明显拐点,是典型的缓降型曲线,说明超薄型PCC桩在滩涂超软土地基中也能表现出良好的受力特性。试桩单桩极限承载力为260 kN,即单桩承载能力特征值为130 kN,桩顶最大沉降仅为37.92 mm,均满足设计要求。

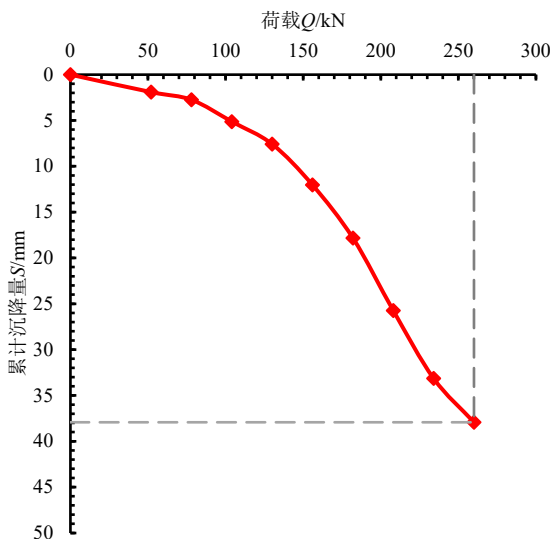


图6 单桩竖向静载试验 $Q-S$ 曲线图

Fig. 6  $Q-S$  curve of static load test of single pile

单桩复合地基静载试验从加载至极限荷载时, $P-S$ 沉降曲线均未出现明显陡降,详见图7。基于试验报告实测数据<sup>[15]</sup>,并结合规范<sup>[12]</sup>第5.4.3条对复合地基承载力取值方法的要求,承载能力特征值不得大于最大试验荷载的一半,故本次试桩的单桩复合地基承载力特征值为90 kPa,远高于原地基承载力。

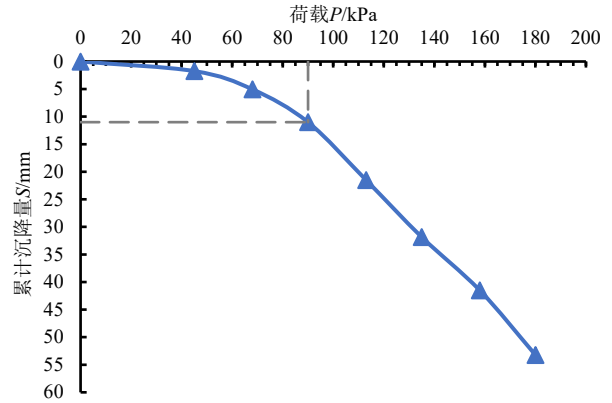


图7 单桩复合地基静载试验 $P-S$ 曲线图

Fig. 7  $P-S$  curve of static load test of single pile composite foundation

## 4 有限元数值模拟

现场试验造价高、难度大,且由于现场条件的限制,超薄型PCC桩身未埋设应变片,无法测得桩身轴力分布情况。为研究其在超软土中的荷载传递机理,在现场试验的基础上对超薄型PCC桩作进一步研究,利用ABAQUS有限元软件对超薄型PCC桩的单桩竖向静载试验<sup>[16]</sup>进行三维数值分析。

### 4.1 模型建立

现场试验加载过程中,试桩桩身未发生破坏,依据静载试验所用的超薄型PCC桩尺寸进行1:1建模。选取1/2模型进行建模,桩外径为900 mm,内径为740 mm,桩长为10 m。土体模型水平方向为20 m,大于20倍桩体直径;竖直方向为30 m,大于2倍桩身长度。模型中将超薄型PCC桩定义为线弹性材料,弹性模量和泊松比取C15混凝土的参数。土体定义为弹塑性材料,土体建模参数见表2。桩-土接触面切向定义为Coulomb剪切模型,法向均定义为硬接触,可模拟桩在荷载作用下施力脱开的行为。桩-土接触面的摩擦系数 $\mu$ 由RANDOLPH等<sup>[17]</sup>给出如下公式:

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \phi \cos \phi}{1 + \sin^2 \phi} \right) \quad (1)$$

$$\mu = \tan \psi \quad (2)$$

式中: $\phi$ 为土体内摩擦角; $\psi$ 为桩-土界面摩擦角。

模型限制桩周土外围平面与桩端土底部3个方向的位移,顶部自由,对称面设置为对称边界。

网格划分采用C3D8R实体单元,桩身、桩-土接触面与土体网格一致,以保证计算精度与速度合适,且有利于计算的收敛。计算时考虑土体自重产生的初始应力场,有限元模型网格划分图如图8所示。



表 2 土体建模参数  
Table 2 Parameters of soil modeling

层号	土层名称	层厚/m	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	固结快剪		压缩模量 $E_{1-2}$ /kPa
				黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)	
1	淤泥质粉质黏土	7	17.6	15.7	9.2	2.94
2	淤泥	17	16.9	14.5	8.1	3.21
3	黏土	6	18.1	21.8	8.2	3.68

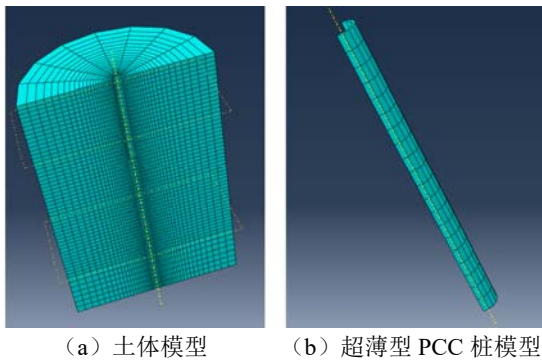


图 8 有限元模型网格划分图

Fig. 8 Mesh division diagram of finite element model

### 4.2 计算结果

根据上述建模过程进行计算, 有限元计算荷载-沉降曲线与实测对比如图 9 所示。两条曲线变化趋势相同, 且都是典型的缓降型曲线。在沉降为 37.92 mm 时, 有限元计算竖向承载力为 255 kN, 与实测值 260 kN 相比, 误差为 2%。计算结果与现场实测数据接近, 考虑到建模过程中对桩周土体进行了一定的简化, 可以认为本文所建立的模型与参数的选取是比较合理的。

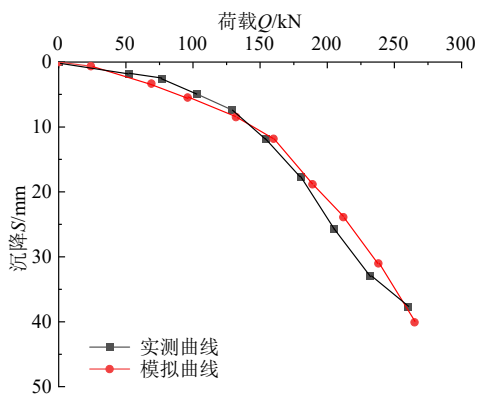


图 9 有限元计算荷载-沉降曲线与实测对比

Fig. 9 Comparison of load-settlement curves calculated by finite element method and measured data

有限元计算超薄型 PCC 桩轴力图如图 10 所示, 由于桩周土体主要为淤泥质粉质黏土层, 土体性质相同, 桩顶荷载沿桩身传递的过程中, 由于侧摩阻力的作用会逐渐减小, 因此桩身轴力随深度的增加而减小。由图 10 可知, 淤泥质粉质黏土层 (0~7 m)

提供的桩侧摩阻力为 171 kN, 淤泥层 (7~10 m) 提供的桩侧摩阻力为 45 kN。

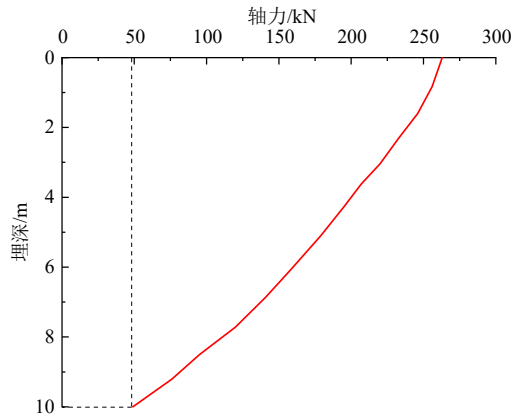


图 10 有限元计算超薄型 PCC 桩轴力图

Fig. 10 Axial force curve of ultra-thin PCC pile calculated by finite element method

在桩顶沉降为 40 mm 时, 有限元计算超薄型 PCC 桩的桩端阻力和桩侧摩阻力分别为 49 kN 和 216 kN, 如图 11 所示。根据试验场地工程地勘资料和规范<sup>[12]</sup> 计算超薄型 PCC 桩的桩端阻力和桩侧摩阻力分别为 55 kN 和 205 kN, 规范计算所得的推荐值与 ABAQUS 有限元计算结果接近, 可认为本文建立的模型是较为准确的。

由图 11 可知, 在竖向荷载作用下, 桩顶所受荷载由桩侧摩阻力及桩端阻力共同分担, 但两者发挥并不同步, 而是随着超薄型 PCC 桩沉降的增加而先后激发。在沉降初始阶段 (0~4 mm), 侧摩阻力首先在超薄型 PCC 桩身上部区域发挥作用, 随后桩身下部的侧摩阻力以及桩端阻力相继发挥。在荷载传递中, 侧摩阻力先于桩端阻力达到极限状态。在施加荷载初期, 桩身上部受到压缩导致桩与土之间产生相对位移, 桩周表面土层对桩体施加向上的摩擦力, 此时桩顶荷载主要由桩周土体通过剪切应力传递。随着荷载的递增, 超薄型 PCC 桩的桩顶位移相应增大到  $D/30$  (30 mm) 后, 桩侧摩阻力从上而下逐渐被充分激发。当侧摩阻力达到极限后, 进一步增加的荷载将完全由桩端阻力承担。桩端阻力发展到极限所需的位移, 在黏性土中一般为桩端直径

的10%~25%，软黏性土中取大值。超薄型PCC桩沉降为40 mm时，未达到完全发挥桩端阻力所需位移，极限竖向承载力还可继续增大，因此荷载-沉降曲线表现为缓降型曲线，与现场结果所得的荷载-沉降曲线表现出相同的特性，曲线平缓光滑且无明显拐点。

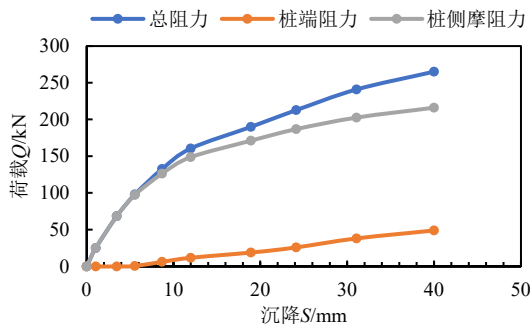


图 11 桩端阻力和桩侧摩阻力曲线图

Fig. 11 Curves of pile tip resistance and pile side resistance

## 5 结论

本文以台州集聚区某学校项目为工程背景，对超薄型PCC桩进行现场静载试验，研究其在滩涂超软土地基中的加固效果。通过现场实测数据与ABAQUS三维有限元模拟结果，分析了超薄型PCC桩在超软土地基中受到竖向荷载作用的荷载传递机理，得到以下结论：

(1) 超薄型PCC桩成桩质量可靠，单桩承载力高，超薄型PCC桩的单桩和单桩复合地基现场试验荷载-沉降曲线均未出现明显陡降，在滩涂超软土地基中，两者均具有较好的承载性能。

(2) ABAQUS有限元模型计算结果与实测值基本吻合，能有效模拟超薄型PCC桩的荷载传递情况。在竖向荷载作用下，PCC桩上部与下部的侧摩阻力异步发挥，沉降初始阶段(0~4 mm)，超薄型PCC桩上部侧摩阻力发挥，随后桩下部侧摩阻力以及桩端阻力相继发挥，且桩侧摩阻力先于桩端阻力达到极限状态。桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担。

(3) 本文通过现场试验和ABAQUS数值模拟研究了超薄型PCC桩的受力、变形和荷载传递机理。未来应进一步探讨桩长和桩径等参数对超薄型PCC桩竖向承载力的影响，以及内外侧摩阻力的发展规律。

## 参考文献

[1] 王积普, 王垚峰. 现浇大直径薄壁筒桩在滩涂软基处

理中的应用[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(14): 266-268.

WANG Jipu, WANG Yaofeng. Application of cast in situ large diameter and thin wall cylinder pile in treatment of coastal beach soft soil foundation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(14): 266-268.

[2] 高志义, 梁爱华. 超软土的界定与特性[J]. 石油工程建设, 2013, 39(6): 6-12.

GAO Zhiyi, LIANG Aihua. Definition and characteristics of ultra soft clay[J]. Petroleum Engineering Construction, 2013, 39(6): 6-12.

[3] 谢庆道, 郑尔康. 大直径现浇混凝土薄壁筒桩及在工程中的应用[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册). 北京: 清华大学出版社, 2003: 471-475.

XIE Qingdao, ZHENG Erkang. Large diameter cast-in-place concrete thin-walled tubular pile and its application in engineering[C]//Proceedings of the 9th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Academic Conference of the Chinese Society of Civil Engineering (Volume I). Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 471-475.

[4] 卢建平, 曹国宁, 张志强, 等. 新型桩基技术——现浇薄壁筒桩技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 704-707.

LU Jianping, CAO Guoning, ZHANG Zhiqiang, et al. Innovation of technology of pile foundation engineering—cast-in-situ thin wall pot pile technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 704-707.

[5] 徐小庆, 刘吉福. 筒桩复合地基和CFG桩复合地基处理公路软基效果对比[J]. 水运工程, 2010(8): 129-132.

XU Xiaoqing, LIU Jifu. Comparison of performance of pipe pile composite ground and CFG pile composite ground under embankment of highway[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(8): 129-132.

[6] 朱向荣, 朱明双. 现浇混凝土筒桩筒介及试验分析[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 41-44.

ZHU Xiangrong, ZHU Mingshuang. Introduction and experimental analysis of cast-in-place tubular pile[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 41-44.

[7] 王军, 叶强, 孙奇, 等. 薄壁筒桩在温州滩涂土地基处理中的应用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3030-3036.

WANG Jun, YE Qiang, SUN Qi, et al. Research on application of thin-wall tubular piles to Wenzhou tidal flat soil foundation treatment[J]. Rock and Soil Mechanics,

- 2012, 33(10): 3030-3036.
- [8] 张德平. 现浇混凝土薄壁管桩与高压旋喷桩工程性能对比[J]. 江西建材, 2017(14): 151-152.  
ZHANG Deping. Comparison of engineering performance between cast-in-place concrete thin-walled pipe pile and high-pressure jet grouting pile[J]. Jiangxi Building Materials, 2017(14): 151-152.
- [9] 金小荣, 莫立成, 吴国彬, 等. 基于PC工法桩的PCC桩在超软地基加固的新实践[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 116-120.  
JIN Xiaorong, MO Licheng, WU Guobin, et al. New practice of PCC pile based on PC pile in ultra-soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 116-120.
- [10] 焦庆. 道路工程软基处理方案比选研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(3): 87-90.  
JIAO Qing. Study on the comparative selection of soft foundation treatment scheme for road engineering[J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2015, 11(3): 87-90.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程: JGJ/T 213—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Composite Foundation of Cast-in-Place Concrete Large-Diameter Pipe Pile: JGJ/T 213—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [14] 台州技师学院一期工程田径场现浇混凝土薄壁管桩静载荷试验报告[R]. 浙江台州: 台州市建设工程质量检测中心, 2022.  
Static load test report of cast-in-place concrete thin-wall pipe pile in track field of the first phase project of Taizhou Technician College[R]. Taizhou, Zhejiang: Taizhou Construction Engineering Quality Testing Center, 2022.
- [15] 台州技师学院一期工程田径场现浇混凝土薄壁管桩复合地基载荷试验报告[R]. 浙江台州: 台州市城市建设工程质量检测中心, 2022.  
Load test report of cast-in-place concrete thin-wall pipe pile composite foundation in the track field of the first phase project of Taizhou Technician College[R]. Taizhou, Zhejiang: Taizhou Construction Engineering Quality Testing Center, 2022.
- [16] 周佳锦, 龚晓南, 严天龙, 等. 软土地区填砂竹节桩抗压承载性能研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3425-3432.  
ZHOU Jiabin, GONG Xiaonan, YAN Tianlong, et al. Behavior of sand filled nodular piles under compression in soft soil areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3425-3432.
- [17] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. Géotechnique, 1981, 31(1): 143-157.