Oct. 2024

岩土力学

# 水泥搅拌桩联合排水预压法地基处理分析\*

Analysis of Foundation Treatment by Cement Mixing Pile Combined with Drainage Preloading Method

段志远<sup>1</sup>,李德晟<sup>1</sup>,薛泽<sup>1</sup>,陈俊昂<sup>2</sup>,梁庆华<sup>3</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510000; 3. 广东省南沙区水务局, 广东 广州 510000)

摘 要:采用水泥搅拌桩联合排水预压法对滨海地区软土地基进行加固处理,通过 PLAXIS 3D 有限元软件 对该方法的加固效果进行数值模拟,模拟分析临水或临空条件下地基的沉降与水平位移,以及软基深度、土体 扰动对地基稳定性的影响。结果表明:水泥搅拌桩联合排水预压法能够有效降低施工期间及施工后的沉降量, 并显著提升地基的抗变形能力和稳定性,特别是在潮汐作用下,该方法能有效控制不均匀沉降,减小路基一侧 的下沉和临水一侧的隆起,抵抗土体扰动;当软基深度较大时,地基的沉降影响范围显著增加,但经过长时间 的固结处理,沉降值显著减小。研究结果可为滨海软基处理提供了重要的理论依据和技术参考。

关键词:水泥搅拌桩;排水预压;有限元模拟;沉降;水平位移

中图分类号: TU470 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0043-07 **DOI**:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.009

DUAN Zhiyuan<sup>1</sup>, LI Desheng<sup>1</sup>, XUE Ze<sup>1</sup>, CHEN Jun' ang<sup>2</sup>, LIANG Qinghua<sup>3</sup>

(1. College of Civil and Transportation, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

3. Nansha Water Affairs Bureau Guangdong Provincial, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In this paper, the cement mixing pile combined with drainage pre- compression method is used to reinforce the soft ground foundation in coastal area, and the numerical simulation of the reinforcement effect of this method is carried out by PLAXIS 3D finite element software, which simulates and analyses the settlement and horizontal displacement of the foundation under the conditions of waterfront or airside, as well as the influence of the depth of the soft foundation and the disturbance of the soil on the stability of the foundation. The result shows that: the cement mixing pile combined with drainage pre- compression method can effectively reduce the settlement during and after construction, and significantly improve the deformation resistance and stability of foundations, especially under tidal action, the method can effectively control the uneven settlement, reduce the subsidence of one side of the roadbed and the bulge of the waterfront side, and resist the soil disturbance: when the depth of the soft foundation is large, the settlement influence range of foundations increases significantly, but after a When the depth of soft foundation is larger, the settlement influence range of foundation increases significantly, but after a long time of consolidation

\*基金项目:国家自然科学基金项目(52178327);广州市南沙区防洪潮安全系统提升关键技术研究项目(穗南水合2022-263)。 作者简介:段志远(2002—),男,本科,硕士研究生,研究方向:软土固化处理。 通信作者:陈俊昂(1981—),男,本科,教授级高级工程师,研究方向:水利工程技术研究、规划设计。 收稿日期:2024-02-28 treatment, the settlement value decreases significantly. The results of the study can provide important theoretical basis and technical reference for coastal soft foundation treatment.

Keywords: cement mixing pile; drainage pre loading; finite element modeling; settlement; lateral displacement

#### 0 引言

排水预压法在我国已是一项成熟的工艺,近年 来,大量的软土地基处理工程使用了排水预压 法<sup>[1-2]</sup>。其中,塑料排水板被广泛地选择为竖向排水 体[3-4]。我国沿海地区软土层厚度大,天然地基的承 载力低、压缩性大,受上部荷载后变形大<sup>[5-6]</sup>,而简 单的排水预压处理并不能解决低承载力和大变形问 题。因此, 塑料排水板与水泥搅拌桩等其他地基处 理方法的联合应用,正逐渐成为各类工程项目中的 常用技术<sup>[7-8]</sup>。胡向前等<sup>[9]</sup>研究了在打设塑料排水板 后,饱和软黏土中打桩引起的土体超静孔隙水压力 分布及消散规律,并对该工艺中预制桩施工设计提 出建议:张伟锋等<sup>[10]</sup>基于塑料排水板 - 水泥搅拌桩 地基处理工程案例,发现软土地基无论是堆载预压 加固还是打完搅拌桩后再堆载加固,软土地基沉降 的影响范围曲线在一定程度上均满足对数关系,据 此能掌握堆载对软基不同位置的影响程度;卢萌盟 等<sup>[11]</sup>以塑料排水板 - 水泥搅拌桩复合地基为研究对 象,提出3种组合桩复合地基固结解析模型,并且给 出3种模型的统一解,使之更具普遍性。

自有限元软件 FLAC、PLAXIS 推广以后,大量 学者使用数值模拟方法分析地基处理工程。刘晶磊 等<sup>[12]</sup>基于摩尔 - 库仑的理想弹塑性模型对水泥土排 桩加固重载铁路路基进行数值模拟,发现水泥土排 桩能有效地控制路基面的沉降和路基坡面的水平位 移,并随着水泥土排桩排数的增加,对路基变形的 约束作用越来越明显;赵明华等<sup>[13]</sup>利用 FLAC 2D 软 件对饱和软黏土中沉桩以及随后的固结过程进行了 模拟,分析了不同应力阶段、不同初始含水量、不 同剪切模量对固结完成后桩侧土体不排水抗剪强度 提高幅度的影响,根据应力路径的相似性给出了考 虑沉桩过程空间性的办法;牛琪瑛等<sup>[14]</sup>使用 FLAC 3D 软件对未加固、碎石桩加固和水泥土桩加固的液 化砂土地基进行数值模拟,发现碎石桩抗液化能力 显著,而水泥土桩抗液化能力十分有限,证实了碎 石桩加固液化砂土地基的抗液化效果与桩土共同作 用的排水效应直接相关。

基于此,以部分工程采用水泥搅拌桩联合排水 预压地基处理方法的广州市南沙新区灵山岛尖南段 海岸及滨海景观带建设工程为例<sup>[15-16]</sup>,利用 PLAXIS 3D 有限元软件进行数值模拟<sup>[17]</sup>,研究一侧临空或临 水、是否浇筑水泥搅拌桩、软基深度、土体扰动等 因素对地基稳定性的影响,研究结果可为类似工程 提供经验。

### 1 工程概况

广州市南沙新区灵山岛尖南段海岸及滨海景观 带建设工程某段工程采用水泥搅拌桩联合排水预压 法处理深厚的软土地基。典型的 K0 + 050 断面在挡土 墙和堤岸线下部采用加密水泥搅拌桩和防滑高压旋喷 桩进行处理。加密的水泥搅拌桩,桩长保持不变,桩 间距加密至 0.4 m,共有 35 根。抗滑桩采用两排高压 旋喷桩,桩径 0.8 m,桩间距 0.7 m。未加密的水泥搅 拌桩桩端位于 - 12 m 的中砂层,桩间距为 1.2 m,呈 梅花形布置,共有 50 根,主要位于路基段的下部。水 泥搅拌桩联合排水预压段地基土体的物理力学参数见 表 1,深厚软土地基由 3.1 m 厚的淤泥层和 12.5 m 厚 的淤泥质粉质黏土层组成,其压缩模量分别为 2.0、 5.5 MPa,孔隙比分别为 1.45、0.73。

|         | 表1           | 地基土体的物理       | 理力学参数            |              |   |
|---------|--------------|---------------|------------------|--------------|---|
| Table 1 | Physical and | mechanical pa | rameters of four | ndation soil |   |
| 天然重度    | 含水率          | 孔隙比           | 内摩擦角             | 黏聚力          | 压 |

| 土层名称 | 土层厚<br>/m | 天然重度<br>γ/ (kN/m <sup>3</sup> ) | 含水率<br>ω /% | 孔隙比 $e_0$ | 内摩擦角<br><i>φ /</i> ° | 黏聚力<br>c/kPa | 压缩模量<br>E/MPa | 竖向渗透系数<br><i>k<sub>v</sub>/</i> (m/d) |
|------|-----------|---------------------------------|-------------|-----------|----------------------|--------------|---------------|---------------------------------------|
| 淤泥   | 3.1       | 17                              | 54.8        | 1.45      | 12.8                 | 11.4         | 2             | $1.0 \times 10^{-7}$                  |
| 粉质黏土 | 12.5      | 19. 2                           | 33          | 0.73      | 10                   | 11           | 5.5           | 3.8 × 10 <sup>-8</sup>                |
| 粉细砂  | 3.9       | 20                              |             |           | 26                   | 0            | 8             | 1.6 $\times 10^{-3}$                  |
| 粗砾砂  | —         | 20                              |             |           | 35                   | 0            |               | 5.8 $\times 10^{-4}$                  |

### 2 数值模型的建立

利用 PLAXIS 3D 软件建立有限元模型,如图 2 所示。模型按照实际尺寸 1:1 模拟计算断面,在 "分阶段施工"中设立地应力平衡、打桩、分级填 筑、通车后 30 年四个阶段。交通荷载的大小设置为 15.06 kN/m<sup>3</sup>, 土层采用摩尔 – 库仑模型, 桩采用 Embeded beam 梁单元, 水位采用钻孔水位和水头共 同搭建。



图 1 堤防临水图 Fig. 1 Embankment facing the water

### 3 结果与分析

3.1 一侧临空或临水条件下的稳定分析

传统打入地基深度的桩基能够均匀承受两侧土 压力的作用,因此不需要考虑失稳问题。但是当桩 周砂土发生液化时,两侧土体给予桩的侧向约束消 失;当桩端承载力足够的情况下,桩变成了1根柱, 因此会发生屈曲或者失稳的可能。同样,当桩一侧 临水或者临空情况下(图2),相对于两侧均匀受力 时,桩仅有一侧存在土压力,且这种土压力会增加 桩的侧向位移;当桩顶存在竖向荷载时,桩身更容 易发生失稳破坏。

如图1(b)所示,当临空、临水高度高、水下 坡度比较大时,对于临水结构物的稳定性有较大影 响。为了对比一侧临空与一侧不临空情况,将堤防 前部进行逐层开挖,将开挖后的计算结果与不开挖



图 2 桩基一侧临水或临空示意图 Fig. 2 The sketch map of one side of pile foundation facing water or air

的计算结果进行对比。

当对临水一侧采取分层开挖时,随着开挖的进行,土体侧向位移和竖向沉降必定会随之变化,图3 为无临空情况与有临空情况下的对比图。通过对比 可以发现,侧向位移的最大值在堤岸线上,且以堤岸 线为圆心向四周以同心圆的方式扩展(图3(a)), 随着开挖的进行,同心圆的圆心逐渐向临水一侧发 生微小移动,同时也向土体深部发生微小移动。竖 向沉降的变化更加明显,竖向位移在整个平整的开 挖面上呈现出较为均匀的最值,之后以抛物线的形 式向临水一侧和路基一侧扩展,经过了开挖全过程、 施工、稳定30年之后,如图3(b)所示,沉降较 小的区域几乎覆盖整个模型,表明大部分区域的竖



### 岩土力学

向沉降接近稳定。而沉降较大的区域仅存在网袋抛石的小部分范围内,沉降值最大达到480 mm,说明这些区域的沉降较为集中,局部土体仍有一定的变形。

表 2 为临水堤防变形值的对比。一侧临空的工况即为分层开挖的模型,无临空的工况即为正常处理时的模型。由对比可知,当出现一侧临空时,竖向位移为无临空的 3 倍,水平位移为无临空的 2 倍,存在极大的安全隐患。

 表 2
 临水堤防变形对比表

 Table 2
 Contrast table of water lifting deformation

 位移指标
 无临空
 一侧临空

|        | 20 IA LL | 14114 14 |
|--------|----------|----------|
| 最大竖向位移 | - 0. 609 | - 1. 767 |
| 最大水平位移 | - 0. 389 | -0.760   |
|        |          |          |

3.2 水泥搅拌桩对地基稳定性的影响

地基下部土层的物理力学性质较差,不能单独作 为基础使用,需要配合桩基共同作用,尤其是对于堤 坝工程,水头一般较高,可能存在涨潮落潮的情况, 更是需要设置大量的桩基来保证工后的稳定性能。

设置水泥搅拌桩的计算模型示意图如图 4 所示, 图 5 为施工期和工后 30 年(以下简称"工后")的 沉降云图。对比发现施工期内的竖向沉降主要来源 于交通荷载的施加,施工期的沉降影响范围要大于 工后;在近岸一侧会发生隆起,隆起程度相同。施 工期表层土体在施工刚结束时的沉降值较大,为 450 mm,但是经过 30 年的排水固结过程,最后的差 异沉降仅为 160 mm,平均 5.3 mm/年。

通过计算可以发现,当不采用地基处理方式直接进行堤坝的建设,不会产生滑坡稳定性问题。主要原因在于选择的断面较为平缓,临空、水侧高度不高,但是会产生很大的竖向沉降,总沉降达到了620 mm,工后沉降为780 mm,严重影响了施工完成后的质量。



/m

图4 计算模型示意图



图 5 水泥搅拌桩地基沉降云图 Fig. 5 Cloud diagram of settlement of cement mixing pile foundation

对于无水泥搅拌桩工况,沉降云图如图6所示。 较大沉降值的区域范围更广,影响半径也有所增加, 较小沉降值的区域已经扩展到整个路基断面,同时, 隆起区域也覆盖了整个海岸段。工后的沉降值甚至 要高于施工期的沉降:施工期的沉降值为620 mm, 工后沉降为780 mm,均高于有桩工况。原因主要在 于下部土体是以淤泥和粉土为主的,砂石层和粗砾石 层的层高较小,承载力较低,因此不能很好地抵挡外 部荷载的作用,当失去了桩的联合承载作用时,沉降 作用就会十分明显。例如工后的沉降为780 mm,平均

岩土力学



Fig. 6 Cloud map of settlement of foundation without cement mixing piles

- 为26 mm/年,远大于有桩工况的5.3 mm/年。
- 3.3 软基深度对地基稳定性的影响

当软基深度较深,且桩处理不能完全处理软土

层时,沉降主要发生于桩端软土层,桩身处理范围 内位移较小。如图 7 所示,为了凸显深厚软基对模 型的影响,在土层设置中选择将底部三层土体全部 改成粉质黏土,桩长和桩距不变,对比深厚软基和 正常处理施工时沉降的差异特性。

对于有桩工况,当基础下部存在深厚软基时, 土体将发生更大范围的沉降和更大的沉降值,如图 8 所示,可以发现几乎所有的上部土层都在交通荷载 的作用下发生了沉降,沉降量为 200~400 mm,影响 深度约为地下 10 m 左右,在海岸一侧发生隆起,最 大的隆起范围在海岸的最远端,隆起的范围要小于 无桩工况,但是左边路基侧的沉降影响范围却远大 于无桩工况。

当桩端下部还存在更深层的软基时,施工期的 沉降量约为无桩工况的2.4倍,且影响范围也更大, 无桩工况的沉降等值线近似为1/4圆弧,而深厚软基 情况下的沉降等值线近似为标准的半圆弧;无桩工 况的差异沉降为780 mm,下方存在深厚软基工况的 差异沉降仅为220 mm,减小了约3倍。说明深厚软 基工况下,施工期间会出现更大的沉降,但工后的 差异沉降则显著减小。



图 8 冰厚状基沉降云图 Fig. 8 Settlement cloud map of deep and thick soft foundation

### 岩土力学

分析原因可能是软土地基的承载能力较弱,因 此在受到荷载作用时会在较短的时间内发生较大的 沉降,但足够长的排水固结时间及桩土应力转化的 时间后(即工后 30 年),桩的作用开始显现,能够 与土体形成具有一定承载能力的复合地基,所以工 后的沉降会远小于单一土层承载的地基。

### 3.4 高潮差对地基稳定性的影响

设置常水位为5.0 m,对应施工期的水位,当变 形稳定后,开始进行涨落潮分析步的计算。设置涨 潮水位为7.93 m,当变形稳定后,落潮水位为4.35 m。 为了体现快速落潮时的影响,将分析步设置为塑性, 计算落潮后变形的稳定性;其后为了体现涨落潮对 堤防的影响,再设置1次涨落潮的模拟。

为了观察涨落潮情况对临水一侧和路堤一侧的 影响是否存在不同,模型中选择了2个计算点:计算 点1为交通荷载正下方的点,计算点2为临水一侧模 型靠近模型边界上的点,图9为落潮后的沉降和涨 潮后沉降的位移差值云图。



图 9 第一次落潮竖直增量位移云图 Fig. 9 Vertical incremental displacement cloud map of the first neap tide

表 3 为两个计算点每一阶段的水平、竖直沉降 值和差异值,可以发现:计算点1 两次的差异沉降均 大于计算点 2,说明当出现涨落潮时,路基一侧的变 形是大于临水一侧的,且路基一侧的沉降值为负值、 临水一侧为正值,说明路基一侧发生了向下的沉降 而临水一侧发生了向上的隆起。计算点1 经过两次涨 落潮,竖向变形递增了 0.002 mm,侧向变形递增了 0.004 mm;但是计算点 2 经过两次涨落潮,竖向变 形和侧向变形均没有任何变化,由此可以说明反复 的涨落潮对于路基一侧是存在轻微影响的,但是对 于临水一侧的影响则可以忽略。

### 3.5 土体扰动对地基稳定性的影响 桩基存在加密的群桩,桩数多,间距小,打桩

表 3 快速落潮工况沉降表 Table 3 Settlement table for rapid ebb tide conditions

|     |       |            | _        |          |            |  |
|-----|-------|------------|----------|----------|------------|--|
| 它旦  | 泥欧北仁  | 竖向         | 沉降       | 水平沉降     |            |  |
| 庁丂  | 加牢疽协  | 计算点1       | 计算点2     | 计算点1     | 计算点2       |  |
|     | 涨潮后沉降 | - 413. 262 | 195.321  | -217.014 | - 103. 482 |  |
| 第一次 | 落潮后沉降 | -413.302   | 195.317  | -217.033 | - 103. 485 |  |
|     | 差异沉降  | - 0. 040   | -0.004   | -0.019   | -0.003     |  |
|     | 涨潮沉降  | -413.300   | 195. 315 | -217.032 | - 103. 485 |  |
| 第二次 | 落潮沉降  | -413.342   | 195.311  | -217.055 | - 103. 488 |  |
|     | 差异沉降  | -0.042     | -0.004   | -0.023   | -0.003     |  |

时极易发生挤土效应,在淤泥质层中产生较大的超 孔隙水压力,由于下部土体的渗透性整体偏低,所 以短时间内超孔压无法消散,打桩时的挤土可以引 起土的隆起和侧移。另一方面,工程桩长较长,但 是大部分桩身并未在持力层中,超出2/3的桩身部分 都在淤泥质土中,因此当上部软土层的状态较差时, 桩就极易处于不稳定状态从而发生倾斜。

为了模拟土体受到扰动,选择桩两侧各1.5 m的范围作为扰动区,受扰动的土体如图 10 所示。该区域内的土体在模型中设置为无黏聚力、低弹性模量和高泊松比,计算点位于扰动区域的中心点。



图 10 土体扰动变形示意图 Fig. 10 The schematic diagram of soil disturbance deformation

计算点对比土体扰动对土层水平、竖向位移的 变化,云图中的虚线框代表原模型的土层分层,经 过计算后的变形如图中阴影部分所示。表4为计算 点的水平和竖向变形数值,当土体因为打桩而受到 扰动时,水平位移和竖向沉降都会有所增加,其中 水平位移增加了34 mm,竖向沉降增加了16 mm,变 化幅度整体不大,反映在云图上并不明显,说明采 用水泥搅拌桩联合排水预压法处理效果良好,对土 体扰动的抵制能力较强。

| 表 4 计算点变形对比表<br>Table 4 Calculation point deformation comparison table |        |          |  |  |  |
|--|--------|----------|--|--|--|
| 方向   | 受扰动    | 无扰动      |  |  |  |
| 水平   | -0.330 | - 0. 296 |  |  |  |
| 竖直   | -0.112 | - 0. 096 |  |  |  |

/mm

4 结论

(1)水泥搅拌桩联合排水预压法在滨海软土地 基处理能够有效解决传统排水预压法在软基承载力 不足及大变形等问题上的局限性,显著提高了地基 的稳定性和抗变形能力。

(2)在临水或临空条件下,水泥搅拌桩联合排水预压法表现出较强的适应性,能够有效控制施工期及长期使用期间的沉降,尤其是在潮汐变化作用下,该方法有效减少了不均匀沉降的发生,确保了地基的稳定性。软基深度的变化对地基沉降影响较大,而该工法通过联合加固机制显著缓解了由深厚软基引发的沉降问题。

(3)水泥搅拌桩能够有效抵御打桩过程中引起的土体扰动,维持地基的整体稳定性。

水泥搅拌桩联合排水预压法在滨海软基处理中 具有良好的应用效果和推广价值,为类似复杂工程 提供了有力的技术支持。

#### 参考文献

- [1] 王丰裕,席宁中,张惠明. 电渗真空联合预压法软基处理试验 研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (7): 110-117.
- [2] 欧阳财禄.水平-竖向排水板真空预压联合堆载法加固疏浚淤 泥地基试验研究 [D].南昌:江西理工大学,2022.
- [3] 苏若宾,陈庚,林民国,等. 塑料排水板外土体淤堵的试验与 固结计算方法研究 [J]. 科学技术与工程,2023,23 (12): 5210-5216.
- [4] 冯双喜,雷华阳,万勇峰,等.新型辐射排水板真空预压加
   固效果 [J].中南大学学报(自然科学版),2021,52 (3):
   790-805.
- [5] 蔡子勇,乔世范,檀俊坤,等.南沙港区深厚淤泥软土特性及

空间异性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (3): 897-910.

- [6] 肖旺, 郭全元, 钟仕兴. 珠江三角洲软土固化后力学特性研究[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29 (5): 44-47.
- [7] 刘孝江. 水泥搅拌桩和塑料排水板联合处理软基的试验研究和 工程应用 [D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [8] 张甲峰,钱建固,张合青,等.塑料排水板联合超载预压处理 超大面积深厚软基的数值分析 [J]. 岩土工程学报,2013,35 (增刊2):892-896.
- [9] 胡向前, 焦志斌, 李运辉. 打设排水板后饱和软黏土中打桩引 起的孔隙水压力分布及消散规律[J]. 岩土力学, 2011, 32 (12): 3733-3737.
- [10] 张伟锋,陈盛原,韦未. 堆载作用下复合软土地基的沉降规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29 (3):729-740.
- [11] 卢萌盟,白垚,李红军,等.多元组合桩复合地基固结解析模型与解答 [J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊2): 3301-3312.
- [12] 刘晶磊,宋绪国,董捷,等.水泥土排桩加固重载铁路路基的数值分析 [J].铁道工程学报,2014 (6):18-23.
- [13] 赵明华,占鑫杰,邹新军. 饱和软黏土中沉桩以及随后固结过 程的数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013, 40 (2):1-8.
- [14] 牛琪瑛,刘建君,刘少文,等.碎石桩与水泥土桩加固液化地 基的数值模拟研究 [J].岩土工程学报,2011,33 (增刊1): 488-491.
- [15] 刘敏. 软土路基双向水泥搅拌桩承载特性及复合地基变形预测 研究 [D]. 南昌:东华理工大学, 2022.
- [16] 陈盛原,叶华洋,张伟锋,等.水泥搅拌桩联合堆载排水固结 法加固软基的效果评价[J].科学技术与工程,2020,20 (14):5743-5750.
- [17] 宋有前,徐骏峰,王东磊,等. 基于 PLAXIS 3D 模型的地铁 旁深基坑开挖有限元分析 [J]. 建筑技术,2023,54 (23): 2891-2893.

endre ne nor no serve ne no serve ne no serve ne ne ne ne ne

## E – mail: fmhzhly@163.com