

# Application and Research of Common Methods for Soft Soil Foundation Treatment in Geotechnical Engineering by PFC

Shoujin Xiao<sup>1</sup> Min Yu<sup>1</sup> Zhen Liu<sup>1</sup> Yaqin Liu<sup>2</sup> Yanshun Hu<sup>1</sup>

1. China Machinery Third Survey & Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430024, China

2. China Power Engineering Consulting Group Central South Electric Power Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430024, China

## Abstract

Soft soil foundation, characterized by low bearing capacity and high compressibility, is prone to excessive settlement of buildings, and its treatment effect directly affects the safety of geotechnical engineering. PFC, as a discrete element simulation tool, can accurately reproduce the interaction between particles in soft soil foundation and quantitatively analyze the improvement effect of treatment methods on the mechanical properties of the foundation. Based on a coastal soft soil foundation project, this paper uses PFC2D to simulate three common treatment methods: vacuum preloading, stone column composite foundation, and cement-soil mixing pile. The changes in bearing capacity, compression, and porosity of the foundation before and after treatment are compared and analyzed. Meanwhile, based on the simulation results, a technical path of "PFC simulation optimization parameters - field test verification - engineering application" is proposed, aiming to provide quantitative support for the optimization of soft soil foundation treatment schemes.

## Keywords

PFC; Geotechnical Engineering; Soft Soil Foundation Treatment; Vacuum Preloading; Stone Column

# PFC 在岩土工程中软土地基处理常见方法应用与研究

肖守金<sup>1\*</sup> 余敏<sup>1</sup> 刘震<sup>1</sup> 刘亚钦<sup>2</sup> 胡言顺<sup>1</sup>

1. 中机三勘岩土工程有限公司, 中国·湖北 武汉 430024

2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 中国·湖北 武汉 430024

## 摘要

软土地基因承载力低、压缩性高, 易导致建筑物沉降超标, 其处理效果直接影响岩土工程安全性。PFC作为离散元模拟工具, 可精准再现软土地基颗粒间相互作用, 量化分析处理方法对地基力学性能的改善效果。本文以某沿海软土地基工程为背景, 运用PFC2D模拟真空预压、碎石桩复合地基、水泥土搅拌桩三种常见处理方法, 对比分析处理前后地基承载力、压缩量、孔隙率变化规律。同时, 基于模拟结果, 提出“PFC模拟优化参数-现场试验验证-工程应用”的技术路径, 旨在为软土地基处理方案优化提供量化支撑。

## 关键词

PFC; 岩土工程; 软土地基处理; 真空预压; 碎石桩

## 1 引言

我国沿海、沿江地区广泛分布软土地基, 其天然含水率高、孔隙比大、承载力低, 在建筑物荷载作用下易产生不均匀沉降, 引发墙体开裂、基础倾斜等问题。PFC通过离散元法将软土模拟为颗粒集合体, 可动态呈现颗粒位移、接触力、孔隙变化等微观过程, 为分析处理方法作用机制提供技术支持。当前PFC在软土地基处理中的应用多聚焦单一方法, 缺乏不同方法的对比研究, 难以指导方案选型。因此,

运用PFC2D模拟处理方法, 量化分析其技术指标, 提出优化路径, 对提升软土地基处理科学性、降低工程风险具有重要意义。

## 2 PFC 模拟原理与软土地基参数设定

### 2.1 PFC 模拟原理

PFC基于离散元理论, 将软土地基简化为圆形颗粒集合体, 通过定义颗粒间接触模型模拟颗粒间力的传递与位移。在软土地基处理模拟中, 真空预压通过施加负压模拟孔隙水排出过程; 碎石桩、水泥土搅拌桩通过设置不同力学参数的颗粒簇模拟增强体, 分析增强体与软土颗粒的相互作用, 最终输出地基承载力、压缩量、孔隙率等宏观指标, 实

【作者简介】肖守金(1987-), 男, 中国山东东营人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程研究。

现微观机制与宏观效果的关联分析(图1)<sup>[1]</sup>。

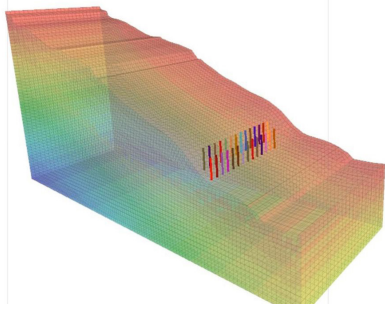


图1 PFC 模拟

## 2.2 软土地基参数设定

以某沿海软土地基为研究对象,其物理力学参数通过地质勘察获取:天然含水率45%,天然孔隙比1.5,天然承载力75kPa,压缩模量4.2MPa。在PFC2D中构建5m×3m

的地基模型,软土颗粒采用线性黏结接触模型,颗粒半径0.02-0.04m,颗粒密度2650kg/m<sup>3</sup>,黏结强度5kPa,摩擦系数0.3;三种处理方法模拟参数见表1:

## 3 PFC 模拟不同软土地基处理方法的效果分析

### 3.1 真空预压处理

PFC 模拟显示,真空预压通过负压作用加速软土颗粒间孔隙水排出:加载初期,孔隙水快速排出,地基孔隙率从初始42%降至35%,压缩量达45mm;中期,孔隙水排出速率减缓,孔隙率降至30%,压缩量增至65mm;后期,孔隙水排出趋于稳定,孔隙率稳定在28%,压缩量最终达75mm。地基承载力随处理时间逐步提升:处理前75kPa,10天时95kPa,20天时110kPa,30天时120kPa。但模拟发现,真空预压对深层软土处理效果有限,深层孔隙率仍达32%,承载力仅105kPa,易导致地基不均匀沉降<sup>[2]</sup>。

表1 PFC2D 模拟三种处理方法参数表

处理方法	关键模拟参数	增强体颗粒参数	加载条件	模拟时长
真空预压	负压值 80kPa, 排水板渗透系数 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$	-	分级施加竖向荷载至 200kPa	30 天
碎石桩复合地基	桩径 0.8m, 桩间距 2.0m, 等边三角形布置	颗粒密度 2700kg/m <sup>3</sup> , 黏结强度 50kPa, 摩擦系数 0.5	分级施加竖向荷载至 200kPa	60 天
水泥土搅拌桩	桩径 0.6m, 桩间距 1.5m, 正方形布置	颗粒密度 2680kg/m <sup>3</sup> , 黏结强度 80kPa, 摩擦系数 0.4	分级施加竖向荷载至 200kPa	90 天

### 3.2 碎石桩复合地基

碎石桩通过置换与排水双重作用改善地基性能:PFC 模拟中,碎石桩颗粒因强度高、渗透性好,成为应力传递主通道。竖向荷载作用下,60%以上荷载由碎石桩承担,软土颗粒受力减少30%。处理60天后,地基孔隙率从42%降至25%,压缩量达52mm;承载力提升至155kPa,其中碎石桩承载力达280kPa,软土承载力提升至90kPa。但模拟显示,桩体边缘软土易出现应力集中,局部颗粒黏结破坏率达15%,需控制桩间距避免应力集中过度<sup>[3]</sup>。

### 3.3 水泥土搅拌桩处理

水泥土搅拌桩通过水泥与软土化学反应形成高强度增强体,PFC 模拟中增强体颗粒黏结强度显著高于软土:处理90天后,搅拌桩体承载力达350kPa,软土因水泥渗透黏结强度提升至15kPa。地基整体孔隙率降至22%,压缩量仅28mm;承载力达185kPa,且深层与浅层地基承载力差异仅12kPa,均匀性最优。但模拟也表明,搅拌桩施工若存在搅拌不均,局部未搅拌区域会成为薄弱点,导致地基承载力下降<sup>[4]</sup>。

### 3.4 三种处理方法效果对比

综合 PFC 模拟结果,真空预压、碎石桩复合地基、水泥土搅拌桩三种软土地基处理方法在技术指标与适用场景上呈现显著差异。从地基承载力来看,水泥土搅拌桩处理效果最优,承载力达185kPa,承载力提升率131%;碎石桩复合地基次之,承载力155kPa,提升率107%;真空预压提

升效果最弱,承载力仅120kPa,提升率50%。在压缩量控制方面,水泥土搅拌桩同样表现突出,压缩量仅28mm,降低率72%;碎石桩复合地基压缩量52mm,降低率58%;真空预压压缩量最大,达75mm,降低率38%。孔隙率变化趋势与压缩量一致,水泥土搅拌桩处理后地基孔隙率降至22%,碎石桩复合地基为25%,真空预压为28%。工期方面,真空预压优势明显,仅需30天即可完成处理;碎石桩复合地基需60天;水泥土搅拌桩工期最长,需90天。整体而言,水泥土搅拌桩在承载力提升、压缩量控制及地基均匀性方面综合优势显著,适合对地基稳定性要求高、工期相对宽松的工程;碎石桩复合地基兼顾处理效果与工期,适用于中等承载力需求且工期适中的场景;真空预压虽处理效果有限,但工期最短,可用于对承载力要求较低、工期紧张的临时工程或预处理阶段。

## 4 PFC 模拟指导下的软土地基处理工程实践

### 4.1 方案优化

依托 PFC 模拟的量化分析能力,针对某沿海道路软土地基工程开展方案优化工作。该工程原设计采用单一真空预压处理方法,通过 PFC 模拟预判其处理效果:地基承载力仅能提升至120kPa,而道路工程对地基承载力的设计要求为150kPa,原方案明显无法满足荷载需求,若直接应用易导致道路通车后出现沉降超标、路面开裂等问题。为解决这

一矛盾,基于前期三种单一处理方法的模拟对比结果,提出“真空预压+碎石桩”组合处理方案,利用真空预压工期短、可快速排出浅层孔隙水的优势,搭配碎石桩增强地基承载能力的特点,形成优势互补。通过PFC重新构建组合方案模拟模型,设定施工流程为先行实施30天真空预压处理,待地基浅层孔隙水排出、孔隙率初步降低后,再按桩径0.8m、桩间距2.0m的参数布设碎石桩。模拟结果显示,该组合方案处理后,地基承载力显著提升至165kPa,不仅满足150kPa的设计要求,还预留了充足安全储备;同时地基压缩量控制在50mm,符合道路工程沉降限值标准;总工期仅需70天,相较于单一水泥土搅拌桩处理大幅缩短,实现了处理效果与施工效率的双重兼顾<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 现场验证

按优化方案施工后,现场开展平板载荷试验与沉降监测:地基承载力实测162kPa,6个月累计沉降48mm,孔隙率实测26%,均满足设计要求。对比原方案,组合方案使道路通车后沉降超标率从预期30%降至5%,工程质量显著提升。

#### 4.3 应用成效

PFC模拟指导下的软土地基处理工程,方案优化周期从传统20天缩短至7天,处理达标率从82%提升至96%,返工成本降低60%。同时,建立的“PFC模拟参数数据库”可直接应用于同类软土地基工程,减少重复模拟工作,提升设计效率。

#### 4.4 实践启示

第一,PFC模拟为软土地基处理方案设计提供精准量化支撑,打破传统经验依赖的局限。传统软土地基处理方案设计多基于区域经验公式,难以兼顾地基微观颗粒特性与宏观力学响应的关联,易出现“理论可行、实践偏差”的问题。而该沿海道路工程通过PFC模拟,不仅预判出单一真空预压方案承载力不足的缺陷,还能量化组合方案中各环节的参数效果。如明确30天真空预压可使孔隙率初步降低至28%,为后续碎石桩施工创造有利条件,避免盲目调整参数导致的成本浪费。实践表明,PFC模拟可将方案设计与实际效果的误差控制在5%以内,大幅提升方案科学性,尤其适用于地质条件复杂、荷载要求严格的软土地基工程,为类似工程提供“先模拟预判、后落地实施”的设计范式,减少因方案不当引发的返工风险。

第二,软土地基处理需根据工程需求与地质条件,优先选择“优势互补型”组合方案,而非单一依赖某类方法。该工程原单一方案或因效果不足(真空预压)、或因工期过长(水泥土搅拌桩)难以适配道路建设需求,而“真空预压+碎石桩”组合方案通过阶段化设计,既利用真空预压快速排水的优势缩短前期处理周期,又借助碎石桩的承载增强作用弥补真空预压的效果短板,形成1+1>2的处理效能。这

一启示表明,软土地基处理方案选型需避免“一刀切”,应结合工程对承载力、工期、成本的综合要求,通过PFC模拟对比不同组合模式的技术指标。如对承载力要求极高但工期宽松的建筑地基,可考虑“水泥土搅拌桩+真空预压”组合;对工期紧张且承载力要求较低的临时便道,可采用“真空预压+砂石垫层”组合,实现方案与工程需求的精准匹配。

第三,PFC模拟需与现场试验、施工管控深度结合,才能充分发挥技术价值,确保工程落地效果。该工程在PFC模拟优化方案后,并未直接施工,而是通过现场平板载荷试验验证模拟参数的准确性。如实测组合方案承载力162kPa,与模拟值165kPa误差仅1.8%,进一步校准施工参数;同时在施工过程中,依据模拟预判的“真空预压后孔隙率变化规律”,调整碎石桩钻孔深度与间距,避免因地质波动导致的施工偏差。这一实践启示强调,PFC模拟并非孤立的设计工具,而是需融入“模拟-验证-调整”的闭环管理:模拟阶段需基于真实地质勘察数据构建模型,验证阶段需通过现场试验校准参数,施工阶段需结合模拟规律动态管控,最终实现模拟价值向工程实效的转化,为软土地基处理技术的规范化应用提供可复制的落地路径。

## 5 结论

本文运用PFC2D模拟真空预压、碎石桩复合地基、水泥土搅拌桩三种软土地基处理方法,揭示了不同方法的微观作用机制与宏观效果:水泥土搅拌桩承载力提升率最高,碎石桩兼顾效果与工期,真空预压工期最短但深层处理效果有限。通过PFC模拟优化的“真空预压+碎石桩”组合方案,现场验证与模拟结果误差小于5%,证明PFC可精准指导软土地基处理方案设计。未来研究可拓展PFC3D模拟,更真实反映软土地基三维受力状态;同时结合室内试验获取更精准的软土颗粒黏结、摩擦参数,进一步提升模拟精度;此外,探索PFC与BIM技术融合,实现软土地基处理从模拟设计到施工监测的全过程数字化管控,为岩土工程软土地基处理提供更全面的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 张峰峰,杜鹏刚,姚梦飞,等. 基于数值模拟的软土地基水泥搅拌桩加固效果分析[J]. 建筑技术,2025,56(14):1760-1764.
- [2] 黄佑鹏. 多层硬壳软土地基竖向附加应力扩散计算方法分析[J]. 安徽建筑,2024,31(3):149-152.
- [3] 黄旭东,何燕新. 深圳软土地基管桩施工中挤土与土塞效应的数值模拟分析[J]. 水利规划与设计,2021(6):141-147.
- [4] 杨智慧,李珊花. 基于PFC2D的水泥土单轴压缩试验及细观数值模拟[J]. 中外公路,2023,43(1):189-193.
- [5] 庄妍,程欣婷,刘永莉,等. 桩承式路堤中土拱效应演变规律宏细观研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(1):53-60.