

# 基于 CEL 法的钻孔灌注桩后注浆加固 数值模拟及承载力分析

周浙红<sup>1</sup>, 杨晓东<sup>2\*</sup>, 王慧荣<sup>3</sup>, 张良夫<sup>3</sup>

(1. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315199; 2. 宁波市天一建筑设计有限公司, 浙江 宁波 315000;  
3. 浙江易通特种基础工程股份有限公司, 浙江 宁波 315800)

**摘要:** 为探究后注浆加固土层对钻孔灌注桩承载力的影响规律, 以江苏省南通市某工程为背景, 基于耦合欧拉-拉格朗日方法 (CEL 法), 采用 ABAQUS 有限元软件建立了后注浆钻孔灌注桩精细化有限元模型, 对压密注浆过程进行了全过程仿真模拟, 发现浆体的扩散形状更趋向于水滴型。将模拟结果与理论值、试验值进行比较, 认为 CEL 法模拟可以作为对实际注浆过程浆体成型的有效参考。同时基于注浆结果, 对是否采用后注浆的钻孔灌注桩承载力进行分析, 将承载力模拟结果与江苏省南通市某工程后注浆钻孔灌注桩的单桩竖向抗压静载荷试验结果进行了对比, 证明了数值模拟结果的准确性。模拟结果从数值仿真的角度为浆体固化后形状的确定提供了依据, 可为相关工程应用及分析提供参考, 同时定量分析结果从机理上证明钻孔灌注桩后注浆能有效提高桩的承载力。

**关键词:** 后注浆加固; 承载力; 数值模拟; CEL 方法; 钻孔灌注桩; 流固耦合分析

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0305-07

## Numerical simulation and bearing capacity analysis of post-grouting reinforcement of bored piles based on CEL method

ZHOU Zhe-hong<sup>1</sup>, YANG Xiao-dong<sup>2\*</sup>, WANG Hui-rong<sup>3</sup>, ZHANG Liang-fu<sup>3</sup>

(1. NingboTech University, Ningbo 315199, Zhejiang, China;

2. Ningbo Tianyi Architectural Design Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Yitong Special Foundation Engineering Co., Ltd., Ningbo 315800, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of post-grouting reinforced soil layer on the bearing capacity of bored grouting piles, a project in Nantong City, Jiangsu Province was explored. A finite element model of post-grouting bored grouting piles was established based on coupled Euler-Lagrange method (CEL method) using ABAQUS finite element software. Subsequently, simulation of the whole compaction grouting process was carried out, and it was found that the diffusion shape of the slurry tended to be of the water-drop type. Comparing the numerical results with the theoretical results and observed results, it is found that the numerical simulation based on CEL method can be used as an effective reference for the analysis of the actual grouting process. At the same time, the bearing capacity of the bored pile with or without post-grouting was analyzed based on the grouting results. The numerical results of bearing capacity of the bored pile were compared with the results of vertical compressive static load test of single pile of post-grouting bored pile in a project in Nantong City, Jiangsu Province, which proved the accuracy of numerical results. The numerical results provided a basis for determining the shape of the slurry after curing from the perspective of numerical simulation, which can provide a reference for relevant engineering applications and analysis. At the same time, the results of quantitative analysis proved mechanically that post-grouting of bored piles can effectively improve the bearing capacity of piles.

**Key words:** post-grouting reinforcement; bearing capacity; numerical simulation; CEL method; bored piles; fluid-solid coupling analysis

收稿日期: 2022-06-28

作者简介: 周浙红 (1970—), 男, 浙江宁波人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为建筑结构设计、大直径桩施工工艺、结构加固与改造。  
E-mail: 602443115@qq.com。

\*通信作者: 杨晓东 (1979—), 男, 浙江宁波人, 本科, 高级工程师, 研究方向为地质勘探。E-mail: 22141431@qq.com。

## 0 引言

钻孔灌注桩作为建筑结构中一种常见的桩基, 在各类建筑和基础设施中被广泛应用。然而, 部分地区如沿海沿江地区的地质条件较差, 钻孔灌注桩往往无法满足相应的工程承载力要求, 使用条件受限。后注浆钻孔灌注桩能够很好地弥补这一缺点。

后注浆钻孔灌注桩是指通过机械钻孔灌注成桩, 待桩身达到一定强度时, 利用钻孔灌注桩桩身预埋的注浆导管将具有固化作用的浆液输送至桩端或桩侧<sup>[1]</sup>。浆液通过渗透置换、压密、劈裂加筋等固化效应, 加固桩端土, 消除桩端残渣及桩侧泥皮的不利影响, 改善桩-土接触条件, 从而提高桩的承载性能。现有研究表明, 经过后注浆处理的桩的承载能力, 可提高 1.5 倍左右<sup>[2]</sup>。

早在 20 世纪 40 年代, MAGG 便提出了土颗粒中浆液流动规律的理论, 即球形扩散理论, 从理论上推导了浆液的影响范围。后人在 MAGG 的基础上又进一步提出了新的扩散渗透理论, 如柱形扩散理论。RAFFLE 等<sup>[3]</sup>基于球形扩散理论, 得到了牛顿流体在静水压力下, 点源注浆半径、注浆量与注浆时间之间的相互关系。许凯等<sup>[4]</sup>使用 ABAQUS 分析桩端后注浆抗压桩的注浆量、浆体模量、长径比对桩端后注浆抗压桩承载特性的影响。杜明芳等<sup>[5]</sup>对后注浆桩竖向承载能力进行数值模拟, 与实际工程相结合, 证实了后注浆对于抗拔桩承载力有提高作用。但目前针对后注浆浆体形状的数值模拟研究仍较少。

为了探究后注浆加固软土层对钻孔灌注桩的承载力性能的影响规律, 本文基于耦合欧拉-拉格朗日方法 (CEL 法), 采用 ABAQUS 软件建立后注浆钻孔灌注桩精细化有限元模型, 对压密注浆过程进行了全过程仿真模拟, 并基于此对注浆前后钻孔灌注桩的承载力进行分析, 探究了钻孔灌注桩后注浆承载力的提升幅度以及相关机理, 特别是对后注浆桩端的砂浆固化的过程进行了探究。

## 1 工程概况

江苏省南通市某 LNG (液化天然气) 接收站扩建工程包括 2 座 20 万 m<sup>3</sup> 的 LNG 全包容储罐及其相关配套设施。工程场地位于海洋近岸潮汐带, 地貌形态上属现代滩涂与水下沙坝交汇处, 地面微向东北倾斜。拟建储罐场地经过人工吹填砂平整, 其

他自然地层均为第四系全新统冲海积物和上更新统海积物, 根据地层岩性、时代成因及其物理力学性质特征, 可以将地层划分为 7 个工程地质层, 如表 1 所示。

表 1 工程地质情况表  
Table 1 Engineering geological conditions

土层名称	厚度/m	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	$E_s$ /MPa	$R_a$ /kPa
①吹填土	9.40	17.86	—	100
②粉砂	7.40	17.86	6.01	160
③粉砂	23.20	17.69	4.61	180
④粉砂	2.00	17.69	6.20	200
⑤粉砂	20.00	19.27	8.05	230
⑥粉砂	23.00	18.69	10.10	260
⑦粉细砂	25.00	18.66	5.41	280

## 2 后注浆加固数值模拟

### 2.1 基于 CEL 方法的压密注浆过程模拟

#### (1) CEL 方法简介

目前在 ABAQUS 商用软件中常用的大变形分析方法有: LAGRANGE 法、EULER 法、CEL 法<sup>[6]</sup>。针对实际工程需解决的问题, 本文采用耦合欧拉-拉格朗日方法对压密注浆的过程进行模拟。CEL 方法综合了 LAGRANGE 法与 EULER 法的优势, EULER 网格固定不动, 材料在固定的网格中流动, 可以同时流动的注浆体与边界固定的桩体进行模拟<sup>[6-8]</sup>。在本例中, 采用拉格朗日体描述桩体, 采用欧拉体对土体与注浆体进行描述。

#### (2) 后注浆过程建模

后注浆常见的施工工艺流程: 灌注桩成孔→钢筋笼制作→注浆管制作→灌注桩清孔→注浆管绑扎→下钢筋笼→灌注混凝土→灌注桩后压浆施工。

在施工的过程中, 浆液的流动将会对后注浆钻孔灌注桩的承载力有较大的影响, 流动的浆液将在桩底部形成一定的固化砂浆, 该固化砂浆会增加桩底的承载力, 从而大幅度提升桩的承载力。为了更好地探究钻孔灌注桩后注浆固化砂浆的形状, 采用 CEL 法对后注浆桩端注浆过程进行模拟。图 1 为有限元计算简图。本文主要针对单桩挤土问题, 荷载和变形均呈空间轴对称, 将三维有限元模型简化为二维模型进行计算。南通某 LNG 工程现场试验桩桩长为 65 m, 桩径为 1.30 m, 为增加计算效率, 选取桩的下部 40 m 建立模型进行计算, 同时在土体顶部施加均布荷载以模拟上部简化土层的影响, 土体水平表面。计算区域水平方向取 20 m, 竖直方向

取 50 m。

在网格划分中,将桩身和土体的网格统一划分,采用 EC3D8R 单元进行划分。边界条件为底部受竖向约束,水平方向土体受水平约束,将欧拉体在水平方向上的速度约束为 0。在荷载施加前通过给桩和模型土施加重力,实现地应力平衡。

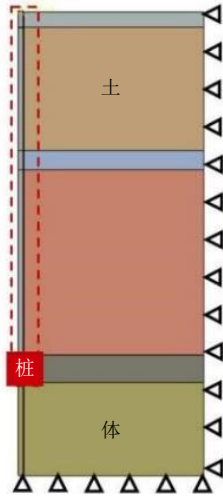


图1 桩土简化二维模型

Fig. 1 Simplified 2D model of pile-soil

(3) 模型材料参数选定

土体选用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。将加固注浆体视为流动体,选择 Eos 状态方程描述其力学性能,取动力黏度为 0.005 cm<sup>2</sup>/s, C<sub>0</sub> 为 1 000 m/s, γ<sub>0</sub> 为 0<sup>[9-10]</sup>,土体的材料属性参照土体勘探结果进行选取,具体材料属性可见于表 1、表 2。其中,泊松比参照顾晓鲁等<sup>[11]</sup>提出的建议泊松比进行选取;土体的弹性模量按钱家欢<sup>[12]</sup>所提公式通过压缩模量进行换算。实际工程中混凝土强度等级为 C40,取混凝土弹性模量为 32 500 MPa,泊松比为 0.2,重度为 24 kN/m<sup>3</sup>。

表 2 场地土层及参数

Table 2 Site soil layer and its parameters

土层名称	直剪 (快剪)		泊松比	e
	c/kPa	φ/(°)		
①吹填土	4.0	28.52	0.28	0.99
②粉砂	9.8	24.50	0.25	0.98
③粉砂	10.9	23.00	0.22	0.99
④粉砂	11.0	22.00	0.23	0.91
⑤粉砂	11.2	18.50	0.22	0.80
⑥粉砂	11.5	18.50	0.21	0.85
⑦粉细砂	12.2	18.40	0.23	0.88

本文中将桩土、桩浆、浆土之间的接触面均设

置为面面接触,其中法向为硬接触,切向为摩擦接触,摩擦系数为 0.3。

(4) 后注浆过程模拟结果

注浆过程中,流动的浆液通过注浆管加压输送至底部,完成后注浆过程,最终在底部固化,如图 2 所示。在浆体加压输送过程中,浆体经过桩底土层的各种孔隙渗流到压力较低处,通过填充孔隙,底部砂浆体不断扩大,最终压力平衡,形成类似于水滴一样的砂浆体。不进行后注浆操作的灌注桩则始终维持着稳定的承载力,桩体底部无任何变化。

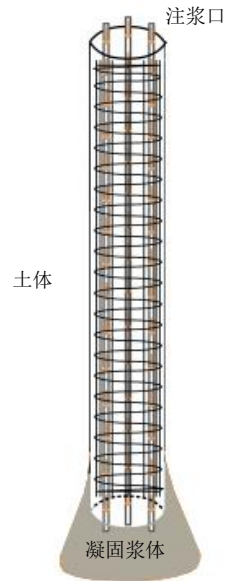


图 2 后注浆施工示意图

Fig. 2 Diagram of post-grouting construction

后注浆过程中浆体形状变化结果如图 3 所示。图 3 中,蓝色部分代表砂浆体,红色部分表示土体,白色部分代表桩体,在土体与砂浆体界面处存在绿色边界,表示砂浆部分渗透到土体中。从图 3 中可以看出,后注浆过程中浆体注入后首先向下挤压呈现小包状;随后浆体向桩外移动,凸出桩体部分截面呈现为圆形;随着浆体注入增多,浆体沿桩壁上行,圆形变为水滴型。

水滴状的固化砂浆扩大了底部桩的承载面积。同时,固化砂浆与周围土体的固结力更大,桩侧的摩阻力也得到了一定的提升。二者构成了钻孔灌注桩后注浆之后承载力大幅度提升的主要原因。乔道勇<sup>[13]</sup>曾提出后注浆浆体影响半径如下:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3h_1 K t r_0}{\beta n}} \tag{1}$$

式中: h<sub>1</sub> 为导管长, m; K 为土层渗透系数, m/s; t 为注浆时间, s; r<sub>0</sub> 为注浆管半径, m; β 为砂浆黏

度与水黏度之比； $n$ 为土体孔隙率。

结合上述公式及桩体底部第6层土体的材料属性可以得到，土体渗透系数参照土体孔隙率确定，系数为  $1.2 \times 10^{-5}$  m/s。傅文洵等<sup>[14]</sup>在压力注浆桩模

型试验研究中发现桩端注浆水泥固结体形状呈圆台体形状，其横切面接近本数值模拟中所得水滴形状。将本次数值模拟中的桩端扩大半径与该试验结果对比，可得表3。

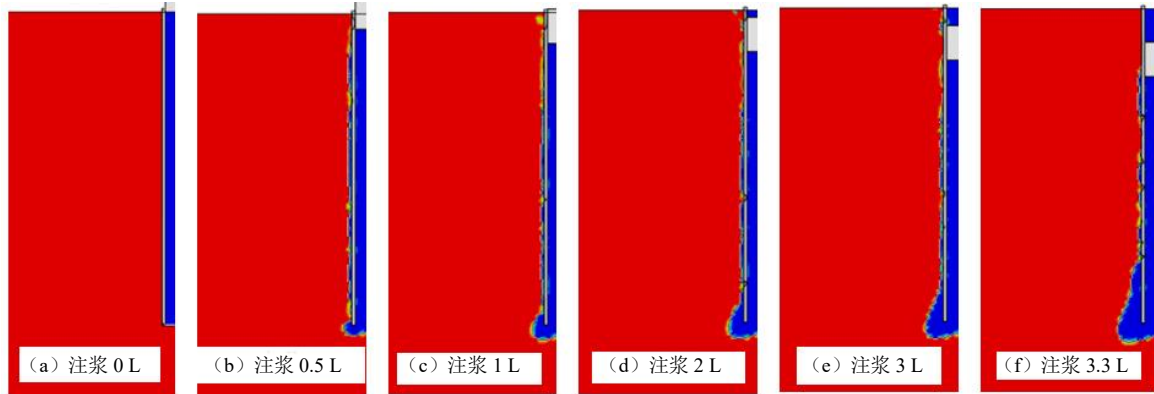


图3 后注浆过程中浆体形状变化数值模拟图

Fig. 3 Numerical simulation of slurry shape change during post-grouting

表3 桩端扩大半径对比表

Table 3 Comparison of pile end expansion radius

注浆量/m <sup>3</sup>	桩底半径扩大倍数		
	理论值	试验值	模拟值
1.0	1.20	—	1.60
2.0	1.68	—	1.80
3.0	2.07	—	2.00
3.3	2.17	2.10	2.20

## 2.2 后注浆钻孔灌注桩承载力数值模拟分析

### (1) 分析数值模型

后注浆钻孔灌注桩在后注浆过程中形成的水滴状固化砂浆，对于基桩的承载能力有很大的影响。为了更好地探究后注浆这一过程对桩体承载力的提升效果，采用数值模拟分析了不注浆工况与后注浆工况下桩体承载力的差别。

在承载力分析模型中，土体的材料属性参照土体勘探结果进行选取，具体材料属性可见于表1、表2。桩体同样参照实际工程情况采用C40混凝土材料进行模拟。固化注浆体材料属性参照许凯等<sup>[4]</sup>所测定参数，取弹性模量为30 MPa，泊松比为0.30，重度为20 kN/m<sup>3</sup>。

采用 CAX4R 单元将桩身和土体的网格统一划分。在模拟过程中，土体、桩体加固区采用二维平面应变4节点实体单元进行模拟。边界条件为土体底部受竖向约束，土体侧面受水平约束。运用荷载控制法对桩分级施加释放荷载，控制桩顶最大荷载为22 000 kN，分15步施加释放荷载。

为了更好地与现场试验结果相对比，模拟桩桩长分别设置为63.8 m、58.7 m、58.4 m，与现场试验的桩-294、桩-162、桩-75 相对照。由此对比不同桩长不注浆情况与后注浆情况下承载力变化。

在注浆后加载前，对桩、土、固化砂浆进行地应力平衡，最大位移的数量级满足地应力平衡的精度要求。

### (2) 后注浆效果

通过位移加载，得出了不同桩长在最大荷载22 000 kN 情况下的沉降值，如表4所示。

表4 最大荷载下未注浆及注浆后各桩沉降对比

Table 4 Comparison of pile settlement without post-grouting and after post-grouting under maximum load

桩长/m	未注浆沉降/mm	后注浆沉降/mm
63.8	43.94	11.54
58.7	42.92	10.69
58.4	39.92	10.12

未注浆情况下，不同长度下桩的沉降量接近。注浆后，由于桩底固结砂浆的作用，使得桩的承载能力大幅度提升，63.8 m、58.7 m、58.4 m 长桩沉降量仅为原沉降量的26.3%、24.9%、25.4%。

## 3 数值模拟与试验结果比较分析

### 3.1 现场试验

江苏 LNG 项目接收站桩基工程施工总桩数为401根，桩型为三岔双向挤扩灌注桩，桩径为1 400 mm。工程桩采用 C40 混凝土，主筋采用

HRB400E、箍筋为HRB400, 桩钢筋主筋连接采用机械连接, 具体桩的配筋布置图如图4所示。LNG储罐工程桩采取旋挖成孔的施工工艺, 桩长不小于70.0 m, 桩端进入第6层土的深度不小于3.0 m。桩

端、桩侧采用后压浆处理, 桩侧设置注浆阀1道。初始注浆的单桩桩端注浆量为2.50 t, 桩侧注浆量为0.94 t, 非初始注浆的单桩桩端注浆量为2.08 t, 桩侧注浆量为0.78 t。

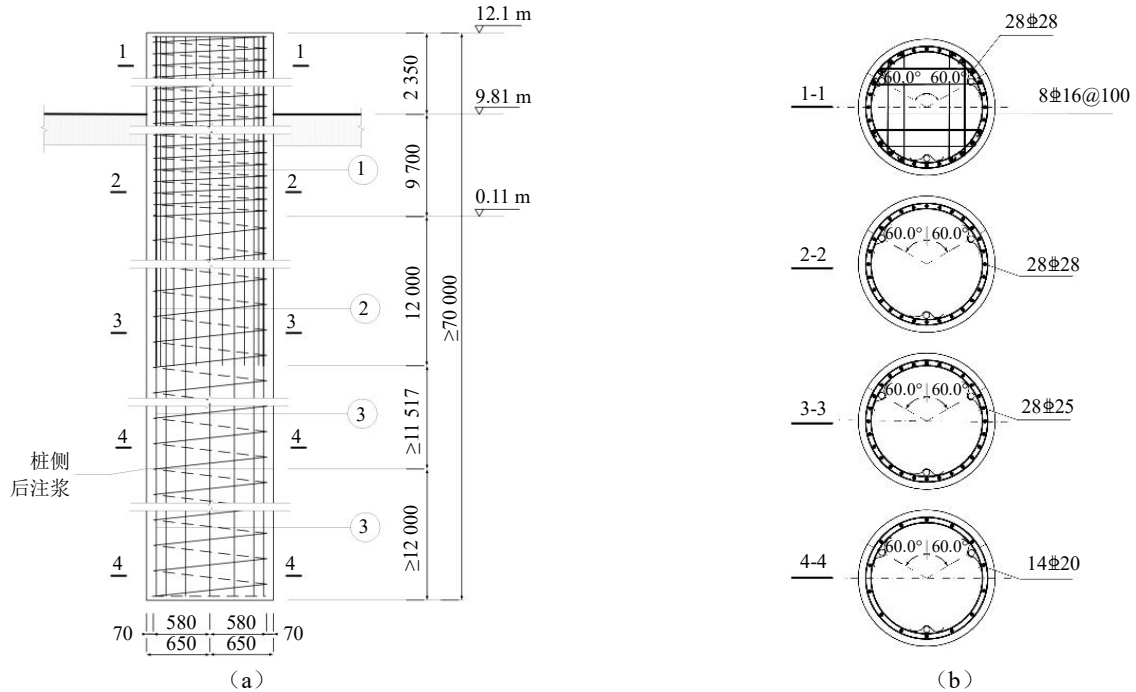


图4 桩配筋详图

Fig. 4 Detail of pile reinforcement

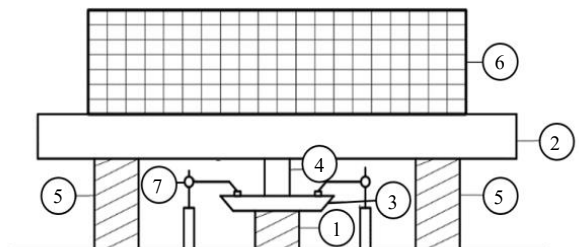
### 3.2 现场试验结果

现场试验中, 加载反力装置采用由3根钢梁搭成的压重平台反力装置, 预制桩(8 m×0.45 m×0.45 m)堆积, 现场堆载量为22 000 kN×1.2, 试验布置如图5所示。最终测试结果如表5所示。

### 3.3 模拟与实测结果对比

根据现场试验的试验结果, 实际情况下后注浆钻孔灌注桩 Q-S (竖向荷载-竖向沉降) 曲线也大致呈现一个弹性的状况, 极限荷载(22 000 kN)作用下, 模拟桩和实际桩都呈弹性状态, 其对比图如图6所示。

从图中可以看出, 后注浆情况下, 数值模拟与实际工程情况下的最大沉降量均接近10 mm。而未注浆的数值模拟结果中, 最大沉降量接近40 mm。相较于不注浆的情况下, 后注浆能够有效地提升桩的承载力, 大大降低桩的沉降量, 与文献[16-17]的试验情况一致。即通过CEL方法模拟特定土层下的水泥砂浆凝浆形状可以准确计算后注浆对结构的承载能力提升情况。



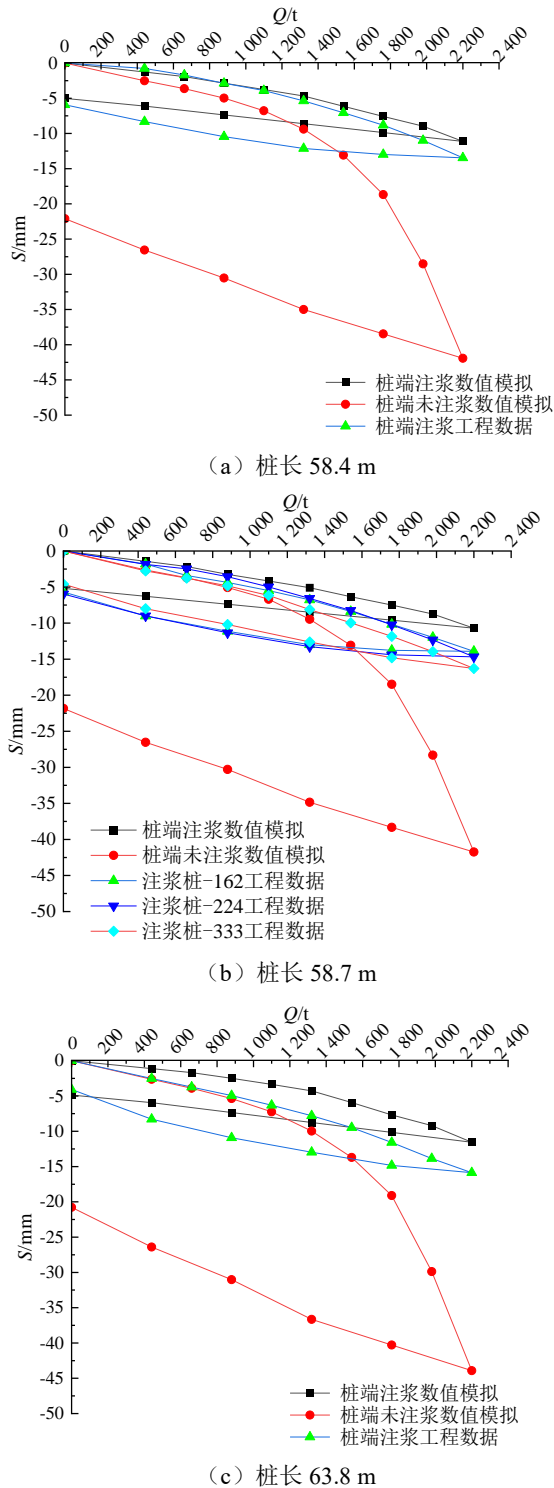
说明: ①受检桩 ②钢梁 ③桩头垫铁 ④千斤顶  
⑤支墩 ⑥配重 ⑦百分表

图5 单桩竖向抗压试验架图

Fig. 5 Diagram of the vertical compressive test frame for a single pile

表5 现场试验测试结果  
Table 5 Test results from field tests

序号	桩号	桩长/m	竖向荷载/kN	最大沉降量/mm	回弹率/%
1	桩-75	58.4	22 000	13.46	55.9
2	桩-162	58.7	22 000	13.92	59.2
3	桩-224	58.7	22 000	14.86	59.3
4	桩-294	63.8	22 000	15.87	74.4
5	桩-333	58.7	22 000	16.29	71.8

图6 不同桩长  $Q-S$  对比图Fig. 6 Comparison of  $Q-S$  for different pile length

## 4 结论

本文通过 CEL 方法对钻孔灌注桩进行后注浆过程模拟, 探究了钻孔灌注桩承载力变化以及后注浆浆液在土体中的形状, 同时将模拟结果与试验结果进行了对比分析, 得出以下结论:

(1) 对钻孔灌注桩进行后注浆处理, 后注浆浆

液会在桩端固结成块, 形成类似于水滴的形状, 水滴状的固化砂浆扩大了底部桩的承载面积, 桩侧摩阻力也得到了提升, 二者共同作用, 提升了后注浆桩体的承载能力。

(2) 采用 ABAQUS 对桩基承载能力进行模拟, 并与实际结果进行对比。数值模拟结果与实际工程结果较为吻合, 而未注浆的数值模拟结果中最终沉降量与塑性变形量较大, 进一步说明了后注浆对桩基承载力的提升作用。

(3) ABAQUS 中采用 CEL 方法, 以二维简化模型模拟后注浆钻孔灌注桩注浆过程及测试承载力, 提高了数值模拟的计算效率, 其模拟结果与实际结果偏差较小, 能较好地满足要求。

(4) 现场试验中, 后注浆桩的  $Q-S$  曲线均呈弹性, 仅有少量塑性变形, 在 22 000 kN 极限荷载作用下, 最大的沉降量为 10 mm, 最大的塑性变形量仅为 6 mm, 承载力较高, 表明后注浆对提高类似地层中桩的承载力有较明显的效果。

## 参考文献

- [1] 刘宜昭, 刘松玉, 冯旭峰, 等. 桩端后注浆嵌岩灌注桩竖向承载性状现场试验研究[J]. 地基处理, 2019, 1(3): 1-9. LIU Yi-zhao, LIU Song-yu, FENG Xu-feng, et al. Field test investigation of the vertical bearing behavior of post-grouting and rock-socketed piles[J]. Journal of Ground Improvement, 2019, 1(3): 1-9.
- [2] 杨松松, 李吉阳, 章定文. 沙漠地区钻孔灌注桩后注浆提升竖向承载力研究[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊 1): 115-120. YANG Song-song, LI Ji-yang, ZHANG Ding-wen. Study on post and grouting of bored piles in desert areas to improve vertical bearing capacity[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 115-120.
- [3] RAFFLE J F, GREENWOOD D A. The relation between the rheological characteristics of grouts and their capacity to permeate soil[C]//Proceedings of the 5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris, 1961.
- [4] 许凯, 秦若凌, 施皆能. 桩端后注浆抗压桩的数值模拟研究[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(4): 77-79. XU Kai, QIN Ruo-ling, SHI Jie-neng. Numerical simulation of post-grouting compression pile[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(4): 77-79.
- [5] 杜明芳, 王强. 后注浆抗拔桩在复杂地层下的试验及模拟研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 126-130, 136.



- DU Ming-fang, WANG Qiang. Study on experiment and simulation of post-grouting uplift piles in complex strata[J]. *Building Structure*, 2021, 51(1): 126-130, 136.
- [6] QIU G, HENKE S, GRABE J. Application of a coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations[J]. *Computers & Geotechnics*, 2011, 38(1): 30-39.
- [7] 邹佑学, 张建民, 王睿. 碎石桩加固可液化场地工程地震响应分析[J]. *地基处理*, 2022, 4(1): 25-31, 64.  
ZOU You-xue, ZHANG Jian-min, WANG Rui. Seismic response analysis for stone column improved liquefiable ground[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(1): 25-31, 64.
- [8] 张兆德, 张心, 李俊来. 基于CEL和ALE方法的自升式平台桩基贯入过程瞬态研究[J]. *船海工程*, 2015, 44(2): 149-153.  
ZHANG Zhao-de, ZHANG Xin, LI Jun-lai. Penetration transient study on pipe-foundation about jack-up platform based on CEL and ALE algorithms[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2015, 44(2): 149-153.
- [9] 赵琨. 基于ABAQUS流固耦合作用下软岩隧洞的围岩稳定性分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.  
ZHAO Kun. Stability analysis of surrounding rock of soft rock tunnel under fluid-solid coupling based on the ABAQUS program[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.
- [10] 杜显赫. 预应力LNG储罐在地震作用下的流固耦合数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.  
DU Xian-he. Numerical simulation of fluid-structure interaction of LNG prestressed storage tank under seismic influence[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [11] 顾晓鲁, 钱鸿儒, 刘惠珊, 等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
GU Xiao-lu, QIAN Hong-ru, LIU Hui-shan, et al. *Ground and Foundation*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [12] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.  
QIAN Jia-huan. *Soil Mechanics*[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1988.
- [13] 乔道勇. 钻孔灌注桩桩底后注浆数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
QIAO Dao-yong. Study on numerical simulation of post-grouting of bored piles[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [14] 傅文洵, 王清友. 压力注浆桩模型试验研究[J]. *北京水利*, 1996(6): 50-54.  
FU Wen-xun, WANG Qing-you. Experimental study of pressure grouting pile model[J]. *Beijing Water*, 1996(6): 50-54.
- [15] 李自强. 桩端后注浆钻孔灌注桩极限承载力不同计算方法的比较[J]. *建筑结构*, 2014, 44(14): 100-102, 95.  
LI Zi-qiang. Comparison of different ultimate bearing capacity calculation methods of pile-end post-grouting bored piles[J]. *Building Structure*, 2014, 44(14): 100-102, 95.
- [16] 滑鹏林, 安一清. 长螺旋钻孔压灌混凝土抗压抗拔构件承载性状试验研究[J]. *建筑结构*, 2018, 48(11): 109-113.  
HUA Peng-lin, AN Yi-qing. Experimental study on bearing properties of compression and uplift components with long spiral drilled compression grouting concrete[J]. *Building Structure*, 2018, 48(11): 109-113.