

# 软基堤防注浆—桩基耦合劈裂机理及智能调控研究

温慧君

(广东欣耀建设有限公司, 广东 韶关 512000)

**摘要** 针对韶关深厚软土地基承载力不足的问题, 本研究创新地提出了注浆—桩基动态耦合加固方法。构建考虑软土流变的浆—土—桩协同作用模型, 揭示浆脉网络扩展与桩基荷载传递机制, 推导出适用于饱和淤泥质土(含水率 50% ~ 65%, 渗透系数  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  cm/s) 的临界劈裂压力公式。集成物联网技术开发智能调控系统, 实现沉降数据实时反馈注浆参数动态优化, 现场应用实现注浆量精度  $\pm 3\%$ 、压力响应  $< 10$  s 的技术突破。研究成果形成软基加固理论—技术一体化解决方案, 为高含水率软土地区提供创新工程实践参考。

**关键词** 软基堤防; 定向劈裂注浆; 耦合模型; 承载机理; 智能调控

**中图分类号**: TU47; TP27

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.005

## 0 引言

广东省广泛分布着深厚海相沉积软土层, 尤其在韶关地区, 淤泥质土厚度普遍达 10 ~ 30 m, 具有天然含水率高(45% ~ 65%)、压缩性大(压缩系数  $> 0.5$   $\text{MPa}^{-1}$ )、抗剪强度低(不排水抗剪强度 10 ~ 25 kPa)等显著工程特性, 导致堤防、道路等基础设施在建设及运营过程中面临地基承载力不足、工后沉降过大等突出问题<sup>[1]</sup>。传统软基处理方法如水泥搅拌桩、排水预压法等在广东地区应用时, 常因软土触变性强、渗透性差而出现桩身强度不均匀、固结周期过长等问题, 难以满足快速施工与长期稳定性的双重需求。

注浆加固技术因其施工灵活、可控性强, 在软基处理领域得到广泛关注, 尤其定向劈裂注浆通过高压浆液在土体中形成网状浆脉结构, 可有效提高土体整体性和承载性能<sup>[2]</sup>。然而, 现有研究多聚焦浆液扩散规律或单一注浆参数优化, 缺乏对注浆压力与桩基沉降动态耦合作用的系统分析, 且针对韶关高含水率软土的劈裂阈值、浆脉空间分布模式等关键参数尚未建立地域适应性模型。此外, 传统注浆施工依赖经验调控, 难以实时响应复杂地层中浆液流动性与土体变形的非线性关系, 导致加固效果离散性大<sup>[3]</sup>。

## 1 定向劈裂耦合模型构建

### 1.1 力学控制方程与理论框架

针对韶关地区软土特性, 建立考虑浆—土—桩相互作用的耦合模型。基于弹塑性力学和流体动力学理论, 推导出控制定向劈裂过程的关键方程。

### 1. 浆液劈裂压力阈值方程:

$$p_f = \sigma_t + K_0 \sigma_v + \alpha S_u + \beta \sqrt{\frac{E_s \cdot \gamma_w}{k}} \quad (1)$$

其中,  $p_f$  为临界劈裂压力 (kPa);  $\sigma_t$  为土体抗拉强度 (5 ~ 15 kPa);  $K_0$  为静止侧压力系数 (0.5 ~ 0.7);  $\sigma_v$  为竖向有效应力 (kPa);  $S_u$  为不排水抗剪强度 (10 ~ 25 kPa);  $E_s$  为压缩模量 (2 ~ 8 MPa);  $k$  为渗透系数 ( $10^{-6} \sim 10^{-8}$  cm/s);  $\gamma_w$  为水的重度 (10 kN/m<sup>3</sup>);  $\alpha$ 、 $\beta$  为经验系数 (1.2 ~ 1.5, 0.8 ~ 1.2)。

### 2. 浆液扩散控制方程:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w n \beta_f} \nabla^2 P + Q(t) \quad (2)$$

其中,  $n$  为孔隙率 (0.6 ~ 0.8),  $\beta_f$  为浆液压缩系数。

### 3. 桩基沉降耦合方程:

$$\Delta S = \int_0^L \frac{q(z) - \eta \cdot P_g(z)}{E_s(z)} \cdot \exp(-\lambda z) dz \quad (3)$$

其中,  $\eta$  为耦合系数 (0.3 ~ 0.6),  $\lambda$  为衰减系数 (0.05 ~ 0.1  $\text{m}^{-1}$ )。

### 4. 浆液粘度时变方程:

$$\mu(t) = \mu_0 \cdot e^{-kt} + \gamma \cdot \nabla P \quad (4)$$

其中,  $\mu_0$  为初始粘度;  $k$  为剪切稀化系数,  $\gamma$  为压力梯度修正因子。

## 1.2 数值模拟与参数验证

韶关典型软土模型参数取值范围见表 1。

本研究采用 FLAC3D 有限差分软件建立三维数值模型, 对韶关典型软土地层中定向劈裂注浆与桩基沉降

的耦合作用进行系统模拟。模型构建基于韶关某堤防工程地质勘察数据,计算区域选取20 m(长)×20 m(宽)×15 m(深)的典型软土剖面,采用六面体单元进行网格划分,最小单元尺寸控制在0.5×0.5×0.3 m以保证浆液扩散前沿的模拟精度。模型边界条件设置如下:底部采用完全固定约束,四周施加法向位移约束,顶部为自由排水边界,地下水埋深按实际工况设定为1.5 m。材料本构关系选用修正Cam-Clay模型,该模型能较好地反映韶关软土的高压缩性和应力路径依赖性,其关键参数通过三轴固结不排水试验获取。

表1 韶关典型软土模型参数取值范围

参数	符号	取值范围	测试方法
含水率	$w$	45%~65%	烘干法
孔隙比	$e$	1.2~1.8	比重计法
渗透系数	$k$	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s	变水头试验
压缩模量	$E_s$	2~8 MPa	固结试验

注浆过程模拟采用等效渗透法,通过自定义Fish函数实现浆液粘度时变特性的模拟。计算时步设定为0.01 s以满足数值稳定性要求,每个注浆循环模拟耗时约6小时。为验证模型可靠性,选取三个典型工况进行对比分析:工况一为常规压力注浆(0.6 MPa),工况二采用分级加压注浆(0.3~0.9 MPa),工况三结合智能调控系统进行动态注浆。模拟结果显示,分级加压注浆可形成更为均匀的浆脉网络,其有效扩散半径比常规注浆提高28.6%,与现场钻孔取芯结果呈现良好的一致性<sup>[4]</sup>。

参数敏感性分析表明,软土初始孔隙比和渗透系数对注浆效果影响最为显著,当孔隙比从1.4增至1.6时,达到相同扩散半径所需注浆压力降低约18%;而渗透系数低于 $1 \times 10^{-7}$  cm/s时,注浆压力需提高35%以上才能形成有效劈裂。

## 2 定向劈裂施工控制技术

### 2.1 关键施工参数优化体系

针对韶关软土特性建立的施工参数优化体系包含三个核心模块:

1. 压力控制模块:采用三级压力调控策略,通过现场试验确定最佳压力组合:渗透阶段(0.3~0.5 MPa, 2~3 min)实现浆液初始渗透;劈裂阶段(0.8~1.2 MPa, 速率 $\leq 0.1$  MPa/s)形成主浆脉网络;稳压阶段(0.6~0.8 MPa, 5~8 min)确保浆液充分填充。不同土层推荐注浆压力参数见表2。

2. 浆液配比模块:考虑到韶关高温高湿环境,开发专用复合浆液,其基准配比为P.O, 42.5水泥:粉

煤灰:膨润土=1:0.3:0.1,添加剂为0.5%木质素磺酸盐+0.1%聚羧酸减水剂,性能指标为初凝时间4~6 h, 28d抗压强度 $\geq 8$  MPa。

表2 不同土层推荐注浆压力参数

土层类型	渗透压力 (MPa)	劈裂压力(MPa)	稳压时间 (min)
淤泥质土	0.3~0.4	0.8~1.0	5~6
淤泥	0.4~0.5	1.0~1.2	6~8
粉质粘土	0.5~0.6	1.2~1.5	4~5

3. 工艺控制模块:“双管双向”注浆工艺,采用 $\Phi 48$  mm袖阀管,开孔间距0.5 m,注浆速度控制为8~12 L/min,分段提升间隔0.5 m。

### 2.2 智能调控系统实施

基于“感知—决策—执行”闭环架构,深度融合数字孪生技术与深度强化学习算法,构建适应韶关软土地层特性的智能化施工管控平台。

#### 2.2.1 多源感知网络构建

高精度传感装置:分布式光纤传感沿注浆管布置温度—应变复合光纤,实时监测浆液扩散路径的温度场变化,反演浆脉空间分布。三维地质雷达采用1.2 GHz高频天线,生成注浆区域电磁波反射剖面,结合反演算法重构浆液扩散三维形态,分辨率达5 cm。微型MEMS传感器嵌入桩基内部的微型加速度计与倾角仪,实时捕捉桩土界面应力重分布特征。

无线传输网络采用5G+LoRa混合组网技术,核心区部署5G基站,边缘区域通过LoRa网关实现全覆盖,确保复杂工地环境下数据丢包率 $< 0.1\%$ 。

#### 2.2.2 数字孪生驱动决策

1. 孪生模型构建:基于BIM模型建立注浆—桩基耦合系统的数字孪生体,集成FLAC3D有限元仿真内核与实时监测数据,动态映射物理施工状态。关键参数包括:

(1) 浆液粘度时变模型:

$$\mu(t) = \mu_0 \cdot e^{-kt} + \gamma \cdot \nabla P \cdot Re^{0.6} \quad (5)$$

其中, $Re$ 为浆液雷诺数, $k=0.02$  s<sup>-1</sup>。

(2) 桩土接触面本构关系:采用修正Drucker-Prager模型,考虑注浆引起的界面刚度非线性强化效应。

2. 深度强化学习优化。设计基于近端策略优化(PPO)的DRL算法,其要素如下:

(1) 状态空间:注浆压力、流量、地层孔隙水压、桩基沉降速率、浆液粘度。

(2) 动作空间:压力调整步长( $\pm 0.05$  MPa)、浆液配比微调( $\pm 0.1\%$ 添加剂)、注浆速度(5~20 L/min)。

(3) 奖励函数:

$$R = \alpha \cdot \frac{1}{\Delta s} + \beta \cdot \frac{Q_{used}}{Q_{total}} - \gamma \cdot \|P_{real} - P_{target}\| \quad (6)$$

其中,  $\alpha=0.6$ ,  $\beta=0.3$ ,  $\gamma=0.1$ ,  $\Delta s$  为差异沉降量,  $Q_{used}$  为有效注浆量。

(4) 训练过程: 通过数字孪生体生成 10 万组虚拟工况数据预训练智能体, 再结合现场数据在线微调, 最终策略网络收敛误差 < 2%。

### 2.2.3 高精度执行控制

1. 自适应注浆装置: 集成并联双泵 (2.5 MPa/30 L·min<sup>-1</sup>), 基于 PID 压力—流量解耦控制 (稳态误差 < 0.5%); 配置压电陶瓷驱动阀门 (响应 < 0.1 s, 微调精度 0.01 MPa), 适配软土触变性。

2. 人机协同界面: AR 可视化平台 (Hololens 2) 实现数字孪生与实景虚实融合, 实时渲染浆液扩散热力图与桩基应力云图, 动态预警异常工况; 通过 AR 标注智能指令, 指导施工人员精准调控注浆路径<sup>[5]</sup>。

## 3 工程应用验证

### 3.1 工程概况与地质条件

某堤防工程作为韶关地区重点基础设施项目, 工程区段总长 1.8 km, 管廊埋深 8~10 m, 勘察数据显示场地区域具有显著的空间变异性, 详细地质参数如下:

1. 地层构成 人工填土层厚 1.8~3.2 m, 松散状态, 含大量建筑垃圾; 淤泥层厚 10~16 m, 含水率 55%~68%, 孔隙比 1.58~1.85, 渗透系数  $2.1 \times 10^{-7}$  cm/s; 粉质粘土层厚 6~9 m, 可塑—软塑状态, 灵敏度  $S_r=3.5 \sim 4.2$ 。工程区典型土体物理力学指标见表 3。

表 3 工程区典型土体物理力学指标

土层类型	含水率 (%)	孔隙比	压缩模量 (MPa)	十字板强度 (kPa)
淤泥层	62.3±5.7	1.72	2.8	14.5
粉质粘土	38.2±3.5	1.12	6.5	32.8

2. 工程挑战: 管廊基础差异沉降要求 ≤ 0.15% L; 周边存在运营中的地铁隧道 (最小净距 9.6 m); 施工期需控制地面隆起 ≤ 30 mm。

### 3.2 实施方案与效果验证

基于本研究提出的耦合模型, 采用“定向劈裂注浆+微型桩”的复合加固方案, 关键技术参数包括:

1. 结构设计: 微型桩的直径 300 mm, 间距 1.2 m, 桩长 20 m (穿透软弱层); 注浆系统的袖阀管直径 48 mm, 注浆段长度 12~15 m; 加固范围为管廊基础外扩 3 m 形成封闭帷幕。

2. 施工控制: 注浆压力采用动态调控 (0.4→0.8→

0.6 MPa); 浆液配比为 42.5R 水泥: 矿粉: 钠基膨润土 = 1:0.25:0.15; 智能监测系统布置 32 个振弦式传感器, 采样频率 1 Hz。

实施效果通过多源监测数据验证, 见表 4。

表 4 主要工程指标对比分析

监测指标	设计要求	实测结果	达标率
最终沉降 (mm)	≤ 50	38.2±6.5	100%
差异沉降 (%)	≤ 1.5	1.12	100%
邻近隧道位移 (mm)	≤ 5	3.8	100%
单桩承载力 (kN)	≥ 450	486±32	100%

该工程的成功实施验证了耦合模型在复杂城市环境中的适用性, 其监测数据为模型参数的进一步优化提供了重要依据。项目采用的智能调控系统实现了注浆总量控制精度 ±3%, 压力调控响应时间 < 10 s 的技术突破, 工程验收后 12 个月的持续监测显示, 地基沉降速率已稳定在 0.2 mm/月, 完全满足设计使用要求。

## 4 结论

基于注浆—桩基耦合模型揭示了软基堤防定向劈裂加固的承载机理并研发出智能调控系统。结合韶关典型软土工程开展研究, 验证了该模型能精准表征浆液扩散与桩基沉降的动态耦合关系, 理论临界劈裂压力与实测值误差 < 15%, 证实了模型在韶关高含水率软基注浆设计中的适用性。工程实践表明, 定向劈裂形成的空间网状浆脉显著增强地基整体性, 自主研发的智能调控系统实现注浆总量控制精度 ±3%、压力调控响应时间 < 10 s 的技术突破。经 12 个月持续监测, 地基沉降速率稳定于 0.2 mm/月, 满足设计规范要求。研究成果为韶关地区软基处理提供了创新解决方案, 其理论与调控技术对类似地质条件工程具有普适价值。后续拟融合人工智能算法优化调控策略, 以应对多变的工程地质环境与复杂工况需求。

## 参考文献:

- [1] 邓义林. 压密注浆在堤防险工段加固工程中的应用[J]. 水利科技, 2024(04):37-39.
- [2] 王海斌. 液力劈裂技术在硬岩开拓巷道中的应用[J]. 机械管理开发, 2021,36(11):167-168.
- [3] 秦宏兵. 桥台基础处理压密注浆施工技术应用[J]. 交通世界, 2020(15):98-99.
- [4] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 砂层压密特性及其对劈裂—压密注浆扩散过程的影响[J]. 煤炭学报, 2020,45(02):667-675.
- [5] 姚达, 张玉婷, 谢明, 等. 压密注浆技术在临海闸站除险加固工程中的应用[J]. 海河水利, 2024(10):108-111.