

基于变形控制的市政道路软基处理技术优化与工程实践

文 / 张 峰 浙江天成项目管理有限公司

摘要：市政道路软基处理的核心在于变形控制，直接关系到道路的长期稳定性和服役性能。本文系统探讨了基于复合地基技术理论、刚度协调及差异沉降分区控制的软基处理优化策略，通过智能监测与动态调控手段提升变形预测精度与施工可靠性。工程实践表明，采用何种软基处理对变形控制导向的设计能有效抑制工后沉降、桥头跳车及路面开裂，为软土地区市政道路建设提供理论支撑与技术保障。

关键词：变形控制；市政道路；软基处理技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.047

引言

软土地基因其高压缩性与流变性，易引发市政道路工后沉降及差异变形，威胁结构安全与行车舒适性。变形控制是软基处理的根本目标，需统筹考虑地质突变、监测失真与施工偏差等风险。本文根据多种软基处理方式与实际工作中应用到的钉型水泥搅拌桩的软基处理方法进行剖析对比，结合土力学原理与智能监测技术，从固结排水优化、复合地基刚度协调及差异沉降分区控制、沉降变形监测等维度，提出系统性沉降变形控制策略，旨在实现全生命周期沉降变形可控，保障道路服役品质与耐久性。

一、市政道路软基处理技术

软基处理方式一般包括：排水固结法、表层处理技术、置换与挤淤技术、动力加固技术、复合地基技术等。

（一）排水固结法

排水固结法的核心工作原理：是通过加速排出软土中孔隙水，以实现土体固结，从而提高地基土的强度和稳定性，减少后期沉降变形。此法适用于高含水量、低渗透性的淤泥质土层，这类土层在自然状态下固结缓慢，通过排水固结法可有效改善其工程特性。

核心措施包括设置竖向排水体和施加预压荷载：

（1）竖向排水体可采用塑料排水板（PVDs）或袋装砂井等，为孔隙水的排出提供通道；

（2）预压荷载施加方式：真空预压法和堆载预压法等，真空预压法通过在密封膜下抽真空形成负压（通常维持85kPa），堆载预压法则可采用分级加载（如3级累计荷载）以增强效果。

在市政道路建设中，可以采用排水板与砂垫层联合处理。采用此方式，10天内就可以降低孔隙水压力，显著提升沉降变化速率，加快地基固结进程。该方法需控制排水板间距（1.0-1.5m）和砂垫层厚度（0.5m以上），并监测沉降位移及孔隙水压力变化，以确保固结效果符合设计要求。若排水板滤膜堵塞或土柱形成，可能会降低排水固结效率，此时需调整工艺参数，以保证排水固结法的有效实施。

（二）动力加固技术

动力加固技术通过外力冲击改变软土结构，提高土

体密实度，从而增强地基的承载能力和稳定性。主要方法包括：

（1）强夯法：使用夯锤（重10-20t）自由落体冲击地基，冲击能达100-300kN·m，适用于杂填土、湿陷性黄土等。但是，强夯过程中产生的振动可能破坏周边管线，在市政工程中需谨慎选用。

（2）冲击碾压：采用三瓣凸轮式压路机（质量15.6t）以10-15km/h速度碾压，冲击力达250t，效率为普通压路机的3-4倍，适用于低饱和粉土和粘性土。施工中需记录碾压参数（次数、速度），静压一次后再冲击碾压，确保路面平整度误差小于2mm。

（三）复合地基技术

复合地基技术属于较为常用的方法，其核心是通过增强软土地基的承载力和抗变形能力，主要采用桩体与土体协同工作的原理，利用周围土体与桩体共同承担荷载，以此提升地基的整体性能。

常见方法：旋喷注浆法和普通水泥搅拌桩、水泥土搅拌桩法等

（1）旋喷注浆法利用高压射流（20-40MPa）破坏软弱土层，同时注入水泥浆液形成固结体。其适用于淤泥、粉土及砂土地基，能有效改善这些类型地基的工程性质；

（2）水泥土搅拌桩法是通过机械搅拌将固化剂（如水泥）与软土混合形成桩体。

水泥搅拌桩又可分为：普通水泥搅拌桩、钉型水泥搅拌桩等，二者均属于深层搅拌法（Deep Mixing Method）的范畴。其中钉型水泥搅拌桩除适用于淤泥质土和饱和黏性土外，特别是针对桥头路基差异变形沉降问题，能有效穿透深层软土层，还能通过监测来控制沉降、变形等实时变化，以达到有效把控施工的质量、安全等目的。

（1）钉型水泥搅拌桩是针对普通水泥土搅拌桩的缺点进行优化后发展起来的一种形式，工作原理核心在于变截面设计。

（2）施工工艺（以本项目采用的钉型双向搅拌工法为例）

①形成钉身：内钻杆和下钻头先旋转下沉至设计深度，此时外钻杆的翼片收拢，形成下部小直径的桩身（钉

身)，提升内钻杆，同时打开外钻杆的翼片，外钻杆反向旋转并提升，喷浆搅拌，形成上部大直径的桩头(钉帽)。

- ②复搅：根据需要进行重复搅拌以确保质量。
- ③成桩：形成一颗完整的钉型桩。

(四) 缺点

施工机械和钻头结构较复杂，且相比传统搅拌桩机造价较高；施工工艺和控制要求更高，需要更熟练的操作人员；专利技术，可能涉及设备准入或技术转让费用。

普通水泥搅拌桩与钉型水泥搅拌桩对比表

特征	普通水泥搅拌桩	钉型水泥搅拌桩
桩身形态	等截面(圆柱形)	变截面(上大下小,呈钉字形)
受力机理	桩土共同受力,但应力分布(上大下小)不完全匹配	受力合理,应力分布与桩形完美匹配,且分布规律相一致
承载力	一般,桩身强度沿深度分布不均匀	较高(同等水泥用量下)
沉降控制	一般	更好(尤其对控制不均匀沉降)
材料利用率	材料利用效率不高	提高了材料利用效率(可节省水泥约10%-30%)
施工设备	相对简单、通用	复杂,需专用双向搅拌钻机
施工工艺	简单、成熟	相对较复杂,控制要求较高
适用土层	适用一般软粘土、淤泥质土等,对于深厚软土层,处理效果有限	同样适用,尤其在淤泥质土较厚、路堤、堆场等柔性荷载下优势明显
成本	设备投入相对较低;同等情况下,水泥用量可能相对较高	设备投入高;同等情况下,水泥用量可能相对更低

二、工程实践案例分析

现通过在中国(福建)自贸区福州片区琅岐区块基础设施项目中,所采用的钉型水泥搅拌桩的软基处理方法与沉降变形监测进行相结合的方法,在设计理念、施工工艺和适用场景上来详细探讨一下,当采用复合地基技术中的钉型水泥搅拌桩的软土地基处理作为工程中质量控制与安全保证的核心环节,利用沉降变形监测手段进行全过程监督管理,验证水泥搅拌桩的现场桩基施工的质量、实际处理效果、从而安全的指导施工进度,使得本工程安全的“眼睛”得以充分发挥。

(一) 技术应用背景与工程需求

1. 工程概况

中国(福建)自贸区福州片区琅岐区块基础设施项目道路及园林绿化工程:道路工程全长约10.28公里、综合管廊1.2公里、4座桥梁工程、28.8万平方米的园林景观工程、12.7公里河道工程,采用钉型水泥搅拌桩的软基处理面积约30万平方米,累计总搅拌桩长约152万延米。

2. 工程地质水文条件

本项目地处海滨地区,沿线现状地形主要为田地、林地、河道及水沟、田埂、堤坝、滩涂等。场地地面高程约在2.95~7.07m左右。场地多属平原路段,场地主要属冲海积、淤积平原地貌单元,上部覆盖层多为第四系不同成因类型的岩土层,建设场地属软弱土,建筑场地类别V类,场地特征周期值为0.90s。大部分路段地

表水系较发育,道路路基沿线分布有若干个河道、池塘及河沟;池塘水深约0.5~2.0m,主要用于渔业养殖;河沟水深约0.5~2.0m,水流较缓,多为轻微淤积,局部河泥可达1.60m,地表水多与闽江相通,主要用于灌溉,雨季时水量较大。地下水主要为上层滞水及孔隙承压水的混合水位,受邻近外围闽江水位及地表用水、农田灌溉和大气降水等影响,地下水位罗零高程多在2.18~5.04m。

3. 软土震陷判别

道路部分路段地表下20米范围内存在饱和软土、淤泥、淤泥混砂,其土层的等效剪切波速值大于90m/s,设计时可不考虑软土震陷影响。

(二) 软土路基设计

软土路基处理主要控制路基工后沉降和稳定性。设计按一次性铺筑路面考虑,采用路面完工15年内的工后沉降控制。一般路段工后沉降 $S \leq 50\text{cm}$,与涵洞衔接处工后沉降 $S \leq 30\text{cm}$,与桥台相邻处工后沉降 $S \leq 20\text{cm}$ 。综合管廊下方软基处理同道路,至管廊底部上方50cm时采用空搅。本项目全线采用钉型水泥搅拌桩处理,钉型扩大头直径1米,长度3米,下部直径0.5米,下部桩长根据淤泥层厚及计算确定,按三角形布置,间距2.0米。

(三) 沉降监测的主要内容

一个完整的水泥搅拌桩地基处理监测系统通常包括以下内容,沉降监测是其中的重中之重:

监测项目	监测仪器	目的
表面沉降	沉降板、精密水准仪	核心项目,直接反映地基竖向变形和加固效果,控制加载速率。
分层沉降	分层沉降管、磁环、分层沉降仪	测量不同深度土层的压缩量,了解软土层的压缩性和桩体的荷载传递规律。
水平位移	测斜管、测斜仪	关键项目,监测深层土体的侧向位移,是判断地基稳定性的重要指标。
孔隙水压力	孔隙水压力计	监测软土中超静孔隙水压力的消散情况,反映固结进度,是控制加载速率的理论依据。
土压力	土压力盒	测量桩土应力比,验证复合地基的工作状态。
地下水位	水位管	监测地下水位变化,辅助分析孔隙水压力数据。

(四) 监测布设与监测精度控制措施

1. 基准点的布设

本工程沉降观测的基准点（本工程首级控制点）的选取应布设在本项目工程影响范围以外，一般不宜少于3倍开挖深度，通常沿路基横断面和纵断面布设，重点布设在路中心、路肩、坡脚等关键位置。在地质条件变化大、填方高度大的地段应加密布设。

首级控制点的布设采用长大于100cm、直径为22mm的钢筋预埋在稳固的地层上，顶部50cm用砼浇筑，露出地面3~5cm。

2. 监测精度控制措施

采用几何水准测量方法，按二等水准精度要求。

(五) 监测频率及预警指标

1. 监测频率

在道路施工前做好各监测点的设置准备工作，道路施工前埋设好所需的监测元件设备，并取得原始数据（道路施工前至少观测3次），施工期：每填筑一层应监测1次，加载间歇期和预压期：可适当减少频率，如每周1-2次，直至沉降稳定。

2. 预警指标

根据现场实际情况，并与设计单位沟通，按《建筑地基基础技术规范》（DBJ13-07-2006）；（现场仪器监测的监测频率）当测试数据变化较大或施工后期应加密监测，出现异常现象应连续监测，一旦数据异常，需加大监测频率至每天甚至每天多次。

当出现下列情况之一时，提高监测频率，并及时通知业主、设计、勘察等单位以采取适当措施：

- a. 监测数据达到报警值。
- b. 监测数据变化较大或速率加快。
- c. 存在勘察未发现的不良地质。
- d. 超深、超长开挖或未及时加撑等违反设计工况施工。
- e. 道路及周边大量积水、长时间连续降雨、市政管道出现泄漏。
- f. 道路附近地面荷载突然增大或超过设计限值。
- g. 周边地表突发较大沉降或出现严重开裂。
- h. 邻近建（构）筑物突发较大沉降、不均匀沉降或出现严重开裂场。
- i. 出现其他影响道路及周边环境安全的异常情况。

(六) 数据分析与控制标准

1. 沉降-时间曲线：这是最重要的分析图表。理想情况下，曲线应逐渐趋于平缓，最终稳定。

如果曲线持续陡峭下降：说明沉降速率过快，需暂停加载；

如果曲线出现“拐点”后突然变陡：可能是地基失稳的前兆，需极度警惕。

2. 沉降速率：这是施工控制的硬性指标。常用控制标准为：

中心地表日沉降速率 $\leq 10 \sim 15\text{mm/天}$ ；

坡脚水平位移速率 $\leq 5\text{mm/天}$ ；

（具体数值需根据设计要求和规范确定）

3. 成果对照参考表

道路深层水平位移(测斜)监测报表

深度(m)	本次位移增量(mm)	变化速率(mm/d)	累计位移(mm)
0.5	2.60	0.87	39.45
1.0	2.57	0.86	36.88
1.5	2.49	0.83	37.28
2.0	2.32	0.77	34.92
2.5	2.20	0.73	33.34
3.0	2.11	0.70	32.68
3.5	1.98	0.66	30.55
4.0	1.93	0.64	29.69
4.5	1.81	0.60	28.05
5.0	1.74	0.58	27.05
5.5	1.65	0.55	25.40
6.0	1.61	0.54	24.30
6.5	1.56	0.52	23.63

沉降板竖向位移监测报表

第七次 第7页 共7页

工程名称: 横二路沉降竖向位移监测
天气: 晴 测试时间: 2020年12月19日

观察者: 计算者: 校核者:

点号	单次变化(mm)	累计变化量(mm)	变化速率(mm/d)
CJ1	-20.3	-122.8	-6.8
CJ2	-10.0	-45.7	-3.3
CJ3	-7.9	-44.2	-2.6
CJ4	-6.0	-39.8	-2.0
CJ5	-4.9	-69.0	-1.6
CJ6	-9.8	-54.4	-3.2

边桩水平位移监测报表

第六次 第6页 共6页

工程名称: 横二路边桩水平位移监测
天气: 晴 测试时间: 2020年12月16日

观察者: 计算者: 校核者:

点号	本次变形量 (mm)		累计变形量 (mm)	
	ΔX	ΔY	$\Sigma \Delta X$	$\Sigma \Delta Y$
S1	-1.30	-1.25	-9.83	-9.77
S2	-1.26	-1.31	-9.69	-9.75
S3	-1.25	-1.26	-9.84	-9.62
S4	-1.18	-1.22	-9.65	-9.58
S5	-1.22	-1.25	-9.70	-9.71
S6	-1.26	-1.21	-9.68	-9.61
S7	-1.21	-1.23	-9.72	-9.72

结语

总而言之，市政道路软基处理需以变形控制为核心，通过理论优化与智能调控的深度融合，显著提升沉降预测精度与工程可靠性。未来应进一步融合数字孪生技术，实现变形风险的动态预警与自适应处理，推动软基处理从被动治理转向主动防控，为城市道路长效安全运营奠定基础。

参考文献

[1] 张翔. 市政道路塑料排水板和堆载预压技术的应用[J]. 四川建材, 2025, (05): 218-220+225.

[2] 荣伟. 水泥搅拌桩在市政道路路基施工中的标准化应用实践[J]. 中国水泥, 2025, (02): 106-108.

[3] 章涛. 市政道路软基加固施工技术应用[J]. 运输经理世界, 2024, (33): 16-18.

[4] 韦斯港. 浅谈市政道路软基处理方法[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (32): 168-170.

[5] 叶文浩. 市政道路施工中的软基处理技术应用分析[J]. 建筑工人, 2024, 45(11): 43-45.

作者简介: 张峰(1977.01-), 男, 汉族, 福建福州人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 市政工程管理技术。