

就地固化技术在牛田洋快速通道项目中的应用

洪培特

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 针对汕头市牛田洋快速通道沿线软土深厚、周边环境敏感的特点, 提出采用就地固化技术先对软土进行浅层处理, 再结合排水固结法或复合地基法进行深层处理的联合处治方法, 并给出固化土层质量检测标准。在大规模施工前选取局部路段对水泥掺量分别为3%、4%、5%的固化剂进行配合比试验, 试验结果表明3种固化剂配合比均能满足设计强度和承载力要求, 从统计结果看水泥掺量4%的固化剂表现最优。利用大规模施工过程中的质量检测数据作为样本进行相关性分析, 得到固化土强度与龄期之间的关系, 为同类项目就地固化设计时强度取值提供参考。

关键词: 软土路基; 就地固化技术; 配合比; 相关性

中图分类号: U416.16

文献标识码: A

Application of In-situ Solidification Technology in the Niutianyang Expressway Project

HONG Peite

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China)

Abstract: In response to the characteristics of deep soft soil and sensitive surrounding environment along the Niutianyang Expressway in Shantou City, a joint treatment method is proposed to use in-situ solidification technology to first treat the soft soil in shallow layers, and then combine drainage consolidation method or composite foundation method for deep treatment, and provide quality inspection standards for solidified soil layers. Before large-scale construction, local road sections were selected to conduct mix proportion tests on curing agents with cement content of 3%, 4% and 5%, respectively. The test results showed that all three types of curing agent mix proportions can meet the design strength and bearing capacity requirements. From the statistical results, it can be seen that the curing agent with cement content of 4% performs the best. Using quality inspection data from large-scale construction processes as samples for correlation analysis, the relationship between the strength of solidified soil and its age was obtained, providing reference for the strength values of solidified soil at different ages in similar projects.

Key words: soft soil roadbed; in-situ solidification technology; mix proportion; correlation

广东滨海地区软土深厚、上覆土层薄且强度低^[1], 软土路基的传统处理方法一般是先进行浅层清淤换填, 用作后续深层处理施工的工作垫层, 但该方法施工速度慢、承载力提升效果有限, 对于城市快速路工程还存在弃淤量大污染环境、回填料紧缺影响工期等问题。近年来, 业界提出了就地固化技术, 采用粉煤灰、水泥和添加

剂对软土进行原位改良处理, 提高软土表层承载能力和整体刚度, 形成人工硬壳层为施工机械提供行走作业面, 能够较好地解决上述传统处理方法存在的问题。

就地固化技术作为一项环境友好的土壤改良技术, 已被日本、荷兰、瑞典等多个国家广泛应用于处理各种软土地基的基础设施项目, 近十年

收稿日期: 2023-07-29

作者简介: 洪培特, 路桥工程师, 本科, 研究方向为道路设计

在国内逐渐兴起，其中浙江周边沿海地区的工程应用及研究较多。陈永辉^[2]、王颖^[3]等通过试验给出了固化土现场强度与室内强度的比值以及实测承载力与理论计算的误差，并提出可与排水固结或者复合地基组合使用；楼秋红^[4]、朱霖^[5]等通过工程实例分析认为就地固化技术在环保、经济方面优势明显；同时道路工程领域技术标准^[6-7]陆续颁布，在设计、施工、检验等方面做出了相应规定。

依托汕头市牛田洋快速通道项目，项目采用就地固化技术改良土体近 65 万 m³，在广东省为首次大规模应用，为相关研究^[8-11]提供了大量数据样本。本文介绍了项目就地固化技术应用及固化剂配合比试验情况，并对固化土体质检试验数据进行分析与总结，为广东省软土路基就地固化技术的应用积累经验。

1 项目概况

牛田洋快速通道位于汕头市中心城区西侧，路线自北向南，北起汕昆高速公路，经金平鲘浦、牛田洋片区后跨越榕江，穿越濠江、潮阳三屿围片区，南接汕湛高速公路与国道 G324 线，路线全长 15.8 km，项目主线以高架桥梁形式为主，采用设计速度 100 km/h、双向六车道的干线功能一级公路标准，南北岸辅道以地面路基为主，采用设计速度 60 km/h、双向六车道的集散功能一级公路标准，全线共设置 5 座互通立交和 1 处管理养护中心。

1.1 地质情况

牛田洋快速通道项目路线经过的地貌单元主要为滨海三角洲平原区，沿线软土广泛分布，多为海相淤泥、淤泥质土以及海陆交互相沉积淤泥质土层，以榕江两岸的牛田洋及三屿围片区为代表。该片区原状为连续成片的养殖水塘（如图 1 所示），淤泥厚度达 30 ~ 40 m，无上覆土层，地层信息如表 1 所示。



图 1 连续鱼塘路段

表 1 典型地层信息表

地层编号	地层名称	厚度分层/m	层底高程/m
4	淤泥	18.0	-17.61
4_1	淤泥质粉质黏土	18.8	-36.41
5_1	粉质黏土	2.9	-39.31
5_5	中砂	6.8	-46.11
12_2_1y	粉质黏土	3.0	-49.11
19a_20	全风化花岗岩	3.2	-52.31

淤泥具有含水量高、灵敏度高、压缩性高、孔隙比较大、抗剪强度低、地基基本承载力允许值低等特点，主要物理力学指标如表 2 所示。

表 2 软土物理力学指标表

试样 深度/m	基础土性指标					刚度指标				强度指标				渗透 系数/ (cm/s)
	密度		初始 孔隙比	含水 率/%	比重	压缩 指数	回弹 指数	次固结 系数	回弹模 量/MPa	总体强度		有效强度		
	干密度/ (g/cm ³)	湿密度/ (g/cm ³)								黏聚力/ kPa	内摩擦 角/°	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/°	
0 ~ 10	0.94	1.56	1.79	68.43	2.72	0.596	0.091	0.019	6.82	21.37	9.50	8.85	22.30	3.24×10^{-7}
10 ~ 20	1.05	1.66	1.75	63.50	2.75	0.432	0.066	0.016	8.44	19.00	10.14	9.28	23.23	1.09×10^{-7}
20 ~ 35	1.15	1.57	1.64	56.99	2.77			0.013						8.81×10^{-8}

1.2 设计情况

牛田洋快速通道辅道总长 12 km，其中约 5.2 km 位于连续水塘范围，干塘晾晒后的原状基底无法满足施工机械设备所需承载力要求，需要先进行浅层处理形成硬壳层作为施工平台。设计过程中对比了清淤换填和就地固化两种方案，从技术层面分析，以同等承载力水平为前提，并考虑沉降推挤补偿，换填体积约为固化体积的 1.5 倍，

清淤产生的弃方量接近 100 万 m³，环保措施复杂，局部路段换填深度达到 5 m，施工不便；从经济层面分析，如换填材料采用片石，清淤换填单价约为 115 元/m³，就地固化单价约为 130 元/m³，换填方案的造价比固化方案多 30%。最终选择采用就地固化技术先进行浅层处理，再针对不同路段特征分别结合排水固结法或复合地基法进行深层处理，软基处理方案如表 3 所示。

表3 软基处理方案一览表

路段特征	处理方案
一般路段	就地固化1 m厚+塑料排水板+堆载预压
涵洞路段	就地固化1 m厚+水泥搅拌桩+堆载预压
主辅同为路基路段	就地固化1.5 m厚+预应力管桩（锤击法）+堆载预压
临近堤防路段	就地固化3 m厚+预应力管桩（静压法）+堆载预压

固化设计厚度主要根据施工荷载计算确定；固化剂配合比通过调研周边已有工程的使用效果，初步拟定为水泥掺量5%+粉煤灰2%+稳定剂0.02%，大规模施工前进行配合比和工艺性试验，根据试验结果调整；固化土各项设计技术参数及对应的质量检测频率如表4所示。

表4 固化土质量检验标准

序号	项目	设计要求	检验频率	备注
1	固化剂配合比	通过室内实验或现场试验确定，允许偏差≤0.5%	通过后台自动定量供料系统控制	
2	厚度	采用静力触探试验，允许偏差≤20 cm	单个区块或每200 m测试点不少于3处	
3	强度	采用十字板剪切试验，剪切值≥80 kPa（14 d）/≥100 kPa（28 d） 采用静力触探试验，锥尖阻力≥0.8 MPa（14 d）/≥1.0 MPa（28 d）	单个区块或每200 m测试点不少于3处	二选一
4	承载性能	采用载荷板试验，承载力≥100 kPa（14 d）/≥130 kPa（28 d）	单个区块或每200 m测试点少于1处	

2 固化剂配合比试验

将场地划分成3块区域，每块区域面积约2500 m²，分别采用配合比为水泥掺量3%+粉煤灰2%+稳定剂0.02%、水泥掺量4%+粉煤灰2%+稳定剂0.02%、水泥掺量5%+粉煤灰2%+稳定剂0.02%的固化剂，水灰比采用1：1，固化深度选取本项目应用范围最广的1 m厚作代表。主要目的是验证不同水泥掺量能否满足设计强度及承载力要求，总结工艺指导本项目大规模施工。

2.1 强度指标

固化土强度指标采用静力触探试验的锥尖阻力值代表，在每块区域随机选取3个测点进行单桥静力触探试验（见图2），试验设备采用KE-2103型静探微机，探头工作面积为10 cm²，深度方向每0.1 m记录一次锥尖阻力数值，9个



图2 就地固化科研试验区

测点在同一天内完成，其中测点1~3位于水泥掺量5%区域，固化土龄期28~36 d；测点4~5位于水泥掺量4%区域，固化土龄期22~27 d；测点7~9位于水泥掺量3%区域，固化土龄期14~21 d。试验结果如图3~5所示。

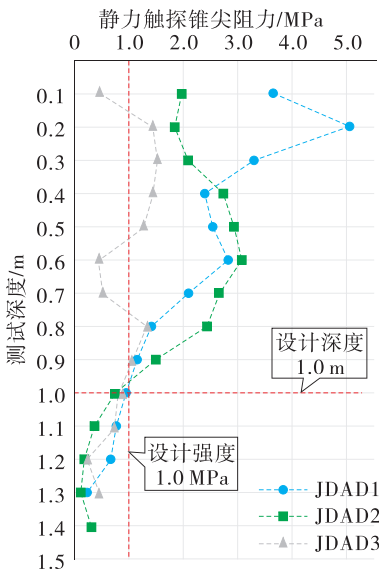


图3 水泥掺量5%的静力触探试验结果

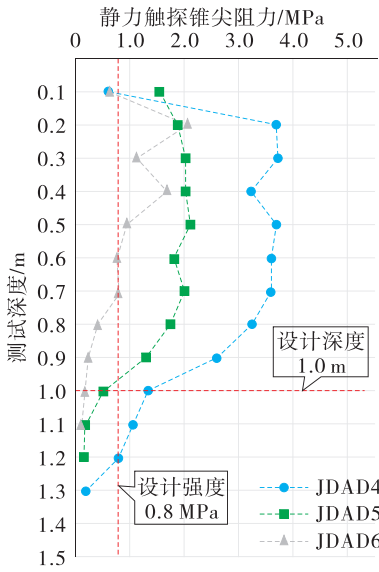


图4 水泥掺量4%的静力触探试验结果

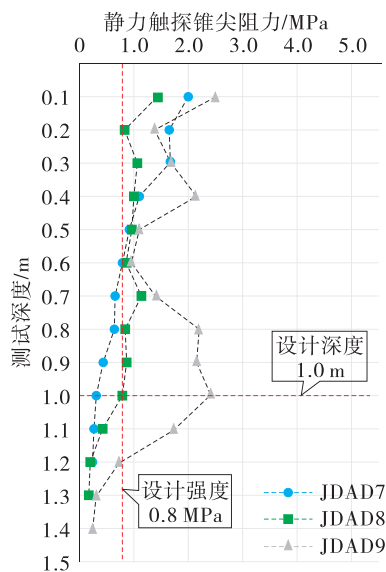


图5 水泥掺量3%的静力触探试验结果

根据静力触探试验结果,在1 m 深度范围内,水泥掺量5% 固化区域的锥尖阻力平均值为1.92 MPa,变异系数为0.56,合格率(每0.1 m 数值大于或等于设计要求值的比例)为80%;水泥掺量4% 固化区域的锥尖阻力平均值为1.83 MPa,变异系数为0.62,合格率为77%;水泥掺量3% 固化区域的锥尖阻力平均值为1.26 MPa,变异系数为0.48,合格率为83%。可见3 种固化剂配合比均可满足设计强度要求,强度大小排序为水泥掺量5% > 4% > 3%,但由于本试验中的龄期没有控制在同一水平,得到的强度大小排序并不准确。

从试验原始数据看,3 块固化区域的锥尖阻力值分散性都偏大,个别数值低于原状土的锥尖阻力值,分析主要是由固化施工过程中对搅拌深度控制不准确,搅拌头提降速率不均匀造成。为消除施工工艺因素的影响,尝试对静力触探试验数据进行处理,去掉每块区域中变异系数最大的1 个测点(JDAJ1、JDAJ6、JDAJ7),并剔除余下测点中明显异常的数据,处理后结果如图6 所示。

根据处理后的数据,水泥掺量5% 固化区域的锥尖阻力平均值为1.82 MPa,变异系数为0.40;水泥掺量4% 固化区域的锥尖阻力平均值为2.50 MPa,变异系数为0.36;水泥掺量3% 固化区域的锥尖阻力平均值为1.38 MPa,变异系数为0.42。3 种固化剂配合比强度大小排序为水泥掺量4% > 5% > 3%,说明在严格控制好施工工艺的情况下,水泥掺量4% 的固化剂配合比更适用于本项目。

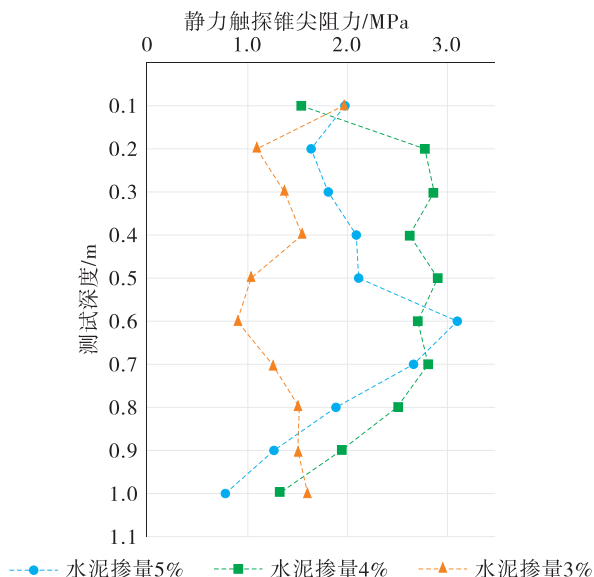


图6 处理后的静力触探试验数据

2.2 承载力指标

固化土承载力指标通过平板载荷试验直接获得,在每块区域随机选取1 个测点进行平板载荷试验,加载系统由油压千斤顶、电动油泵、分油阀和RS-JYC 桩基静载测试分析仪等组成,承压板面积为1.0 m²,最大试验荷载为260 kPa,加载时每级荷载维持120 min,最后一级维持180 min,卸载时每级荷载维持30 min,试验结果如图7 ~ 图9 所示。

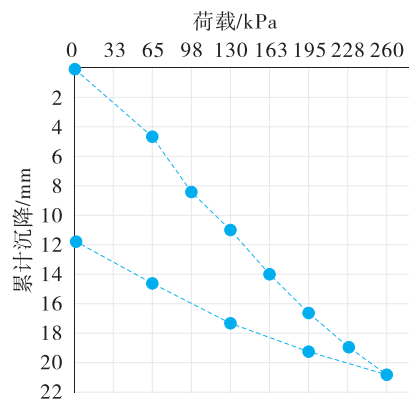


图7 水泥掺量5%的p-s 曲线

根据平板载荷试验结果,水泥掺量5% 固化区域的最大沉降量20.84 mm,卸载后沉降量回弹至11.70 mm,回弹率43.9%;水泥掺量4% 固化区域的最大沉降量20.87 mm,卸载后沉降量回弹至11.31 mm,回弹率45.8%;水泥掺量3% 固化区域的最大沉降量20.27 mm,卸载后沉降量回弹至10.78 mm,回弹率46.8%。

试验加载至最大荷载260 kPa 时,3 块固化区域的p-s 曲线均无明显陡降段,沉降速率均达到

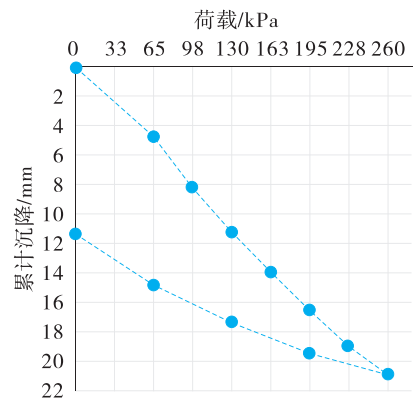


图 8 水泥掺量 4% 的 $p-s$ 曲线

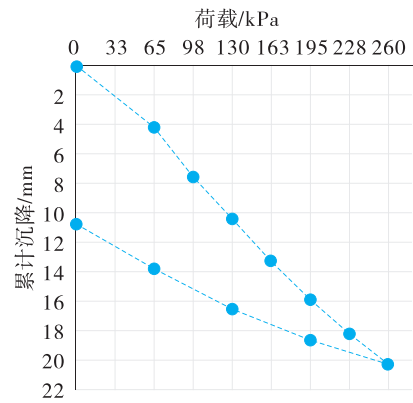


图 9 水泥掺量 3% 的 $p-s$ 曲线

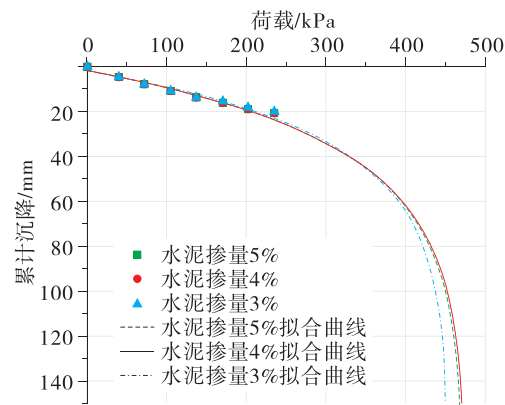


图 10 $p-s$ 拟合趋势曲线

相对稳定标准，承载力特征值取最大试验荷载的一半，即 $260/2 = 130\text{ kPa}$ 。可见 3 种固化剂配合比均可满足设计承载性能要求。

由于平板载荷试验未加载至破坏，所得到的 3 种固化剂配合比的 $p-s$ 曲线均不完整，无法直接获得固化土的极限承载力，基于典型载荷破坏试验曲线的三段论，研究表明采用完整指数函数模型预测这种破坏规律的精度较高^[12-13]，利用 Origin 软件中的 Boxlucas1 指数函数模型对已有试验数据进行拟合并预测，相关系数 R 均达到 0.99，拟合结果如图 10 所示，从图中趋势预测

曲线位置可大致判断 3 种固化剂配合比极限承载力大小排序为水泥掺量 $4\% > 5\% > 3\%$ ，与处理后的静力触探试验数据所得到的强度大小排序一致，预测结果是合理的。

3 质检试验数据相关性分析

3.1 固化土强度与龄期的关系

本项数据样本为 9 个龄期 14 d 和 9 个龄期 28 d 的测点，固化土强度取静力触探试验 1 m 深度范围内的锥尖阻力平均值，以龄期为自变量 (x)、强度为因变量 (y) 整理绘制散点图，如图 11 所示。去掉数据样本中 3 个变异系数偏大的测点 (图 7 中红色三角形点) 及 3 个平均值偏高的测点 (图 7 中绿色正方形点)，余下 12 个测点的强度与龄期之间呈正相关，建立数值关系拟合式 $y = 0.0389x + 0.4475$ ，相关系数 $R = 0.956$ ，固化土强度与龄期相关性极强。根据拟合式计算，龄期 14 d 的固化土强度为 0.99 MPa，龄期 28 d 的固化土强度为 1.54 MPa，均大于本项目的设计值。

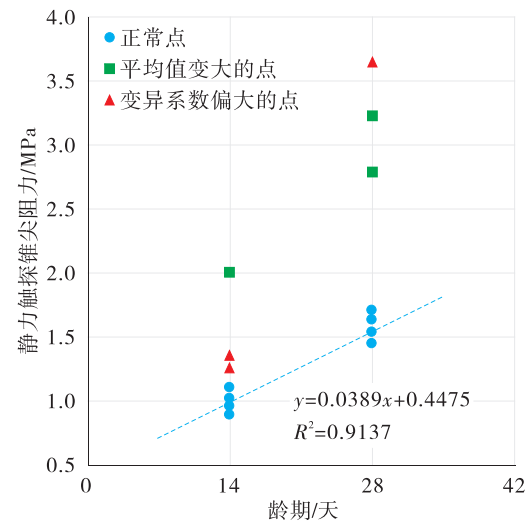


图 11 固化土强度与龄期的关系

3.2 轻型动力触探与静力触探试验的关系

本项数据样本为 5 个龄期 14 d 和 7 个龄期 28 d 的测点，对同一测点分别进行轻型动力触探与静力触探试验，轻型动力触探按每贯入 30 cm 所需击数作为指标，静力触探按每 30 cm 深度范围内读数的平均值作为指标，每个测点形成 0 ~ 30 cm、30 ~ 60 cm、60 ~ 90 cm 三组对应数据，以静力触探锥尖阻力为自变量 (x)、动力触探锤击数为因变量 (y)、按不同龄期整理绘制散点图，如图 12 ~ 图 13 所示。

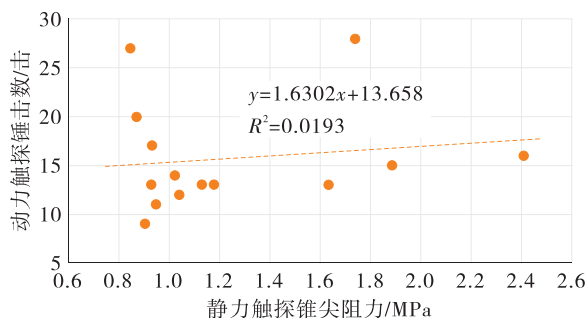


图12 龄期14天的动力触探与静力触探的关系

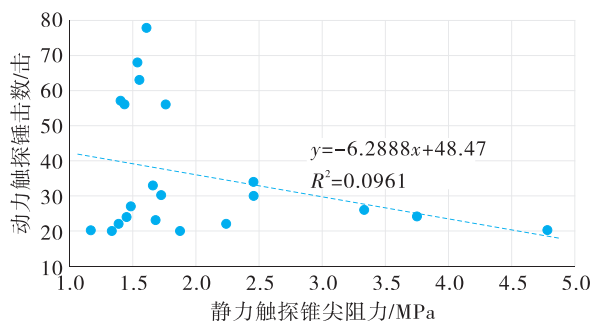


图13 龄期28天的动力触探与静力触探的关系

图中散点无规律分布,动力触探锤击数与静力触探锥尖阻力之间所建立的数值关系拟合式相关系数分别为 $R_{14} = 0.168$ 、 $R_{28} = 0.154$,两者相关性极弱,龄期28 d的动力触探锤击数与静力触探锥尖阻力之间呈负相关,不符合工程逻辑,分析主要是由于轻型动力触探试验受落锤的高度、触探孔的垂直度等人为因素影响较大,不建议采用轻型动力触探代替静力触探作为固化土强度的检测手段。

4 结论

(1) 就地固化技术的应用快速有效地提高了软土表层承载能力和整体刚度,为本项目辅道软基处理和主线桥梁桩基顺利推进奠定了良好基础,同时实现了“零排放、零污染”的绿色施工目标。

(2) 水泥掺量分别为3%、4%、5%的固化剂均可以满足本项目设计强度及承载力要求,从处理后的静力触探试验数据以及平板载荷试验的拟合预测结果来看,水泥掺量4%+粉煤灰2%+稳定剂0.02%的配合比表现最优。如施工均匀度和精细度能够保持高水准,建议采用水泥掺量4%的配合比固化剂,性价比高,可节省投资,否则应适当提高固化剂的水泥掺量,保证最不利位置的固化土质量达标。

(3) 由本项目数据样本分析得到的固化土强度与龄期之间的趋势规律明显,建立的固化土强

度与龄期数值关系拟合式相关系数高,由该拟合式计算得到的固化土强度0.99 MPa(14 d)/1.54 MPa(28 d),可为同类项目就地固化设计时强度取值提供参考。

(4) 由本项目数据样本分析得到的动力触探锤击数与静力触探锥尖阻力相关性极弱,建立的动力触探锤击数与静力触探锥尖阻力数值关系拟合式相关系数低,计算结果误差大,无法准确反映两者之间的关系,不建议采用轻型动力触探代替静力触探进行固化土强度检测。

参考文献:

- [1] 李红中,马占武,张修杰,等.广东省软土分布特征及其对高速公路路基影响的预测研究[J].广东公路交通,2016(6):43-50,54.
- [2] 陈永辉,王颖,程潇,等.就地固化技术处理围海工程吹填土的试验研究[J].水利学报,2015,46(S1):64-69.
- [3] 王颖,李斌,陈永辉,等.强力搅拌机就地浅层固化地基承载特性研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(2):39-44.
- [4] 楼秋红,罗杰.浅谈淤泥质土就地固化技术在湖杭高速公路建设中的应用[J].浙江交通职业技术学院学报,2021,22(4):13-16,24.
- [5] 朱霖,何磊,王章明,等.软土地基就地固化工艺的试验研究与工程应用[J].公路,2023(3):75-80.
- [6] 浙江省市场监督管理局.公路工程强力搅拌就地固化设计与施工技术规范:DB33/T 2383—2021[S].2021.
- [7] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.道路软土地基强力搅拌就地固化技术规程:T/CECS 978—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [8] 沈政,陈龙,陈永辉,等.滩涂地区软土就地固化技术[J].科学技术与工程,2021,21(16):6815-6822.
- [9] 王猛.就地固化在软弱地基处理中的试验研究[J].西部交通科技,2021(5):81-83.
- [10] 张维,韦开腾.粤东滨海相软土就地固化路基检测与分析[J].广东土木与建筑,2019,26(9):78-80.
- [11] 张维,张振兴,韦开腾.软土固化地基轻型触探 N_{10} 与静力触探 q_c 相关性研究[J].广东土木与建筑,2020,27(6):46-48.
- [12] 邓志勇,陆培毅.几种单桩竖向极限承载力预测模型的对比分析[J].岩土力学,2002,23(4):428-431,464.
- [13] 赵春风,李尚飞,鲁嘉,等.完整指数函数拟合单桩荷载-沉降曲线的分析[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(4):486-492.
- [14] 李德晟,陈龙,陈永辉,等.鱼塘路段人工硬壳层承载特性及计算方法[J].科学技术与工程,2022,22(7):2830-2837.