

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.08.009

湿陷性黄土地区灰土挤密桩设计方案研究

刘晓朋, 金 兰

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘 要: 采用正交实验的方法, 通过研究灰土挤密桩在西北湿陷性黄土地区基础处理的影响因素和验收指标情况, 详细对桩径、桩间距、灰土掺量、挤密能量等级与最后验收工程的控制指标的影响关系进行了阐述。系统研究了影响因子包括灰土掺量、桩桩径、桩间距、填灰击实能量等对桩间土压实度、复合地基承载力、瑞利波法测试结果等相关参数的具体量化影响。结论结合实际情况, 给出对应特定工程, 采用灰土挤密桩工法的具体参数指标和指导意见, 为日后相应类型的工程项目提供了系统化的理论支撑。

关键词: 灰土挤密桩; 湿陷性黄土; 正交实验; 组合优化

中图分类号: TU472.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)08-0034-04

0 引言

西北地区黄土的湿陷性机理和湿陷性黄土地基处理一直是岩土力学和道路工程基础工程领域研究的热点和难点问题之一^[1,2]。而灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基一直是比较成熟的工法, 即用石灰和土按一定体积比例(2:8 或 3:7)拌合, 并在桩孔内夯实挤密后形成的桩体结构物^[3]。一般灰土挤密桩法是利用钢套管或振动沉管在地基中成孔, 通过横向挤压作用, 使地基土加密, 然后在孔中填入灰土后夯实而成灰土桩。其作用是通过挤密地基, 部分或全部消除地基土的湿陷性, 并大幅提高地基承载力, 减小均匀地基变形, 进而达到湿陷性黄土地基处理的基础处理工艺^[4]。

灰土挤密桩一般的成孔工艺主要分为沉管法和预钻孔法, 开孔直径 250~450 mm, 挤密后桩体直径为 350~600 mm, 桩间距一般为 0.8~1.6 m 不等^[5]。但是随着灰土挤密桩工艺的日渐普及和推广, 关于桩径、桩间距、灰土掺量、挤密能量等级与最后验收工程的控制指标等的定量关系分析研究很少。本文将结合青海海东某地的实际工程情况, 进行实地的试桩试验, 并通过数学化的正交试验方法和分析理念, 进行系统量化的参数研究和定量分析, 以期得到总体的设计施工指导导则性数据。

收稿日期: 2023-08-28

作者简介: 刘晓朋(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政道路工程规划设计工作。

1 项目现场地质与限制条件情况

1.1 项目现场地质情况

项目场地位于青海省海东市某地, 地质情况 0~13 m 范围内存在 2 层杂填土和素填土层, 地质情况极差, 土质密实度严重不足。

①₋₁ 层杂填土(Q₄^{ml}): 松散-稍密, 稍湿-湿。该层为近期施工堆积, 未沉实, 该路段沿线均有分布, 层厚 1.3~5.8 m, 平均厚度 4.0 m 左右。

①₋₂ 层素填土(Q₄^{ml}): 松散-稍密, 稍湿-湿。该层为近期施工堆积, 未沉实, 该路段沿线均有分布, 层顶埋深 1.3~5.8 m, 层厚 1.3~13.3 m, 平均厚度约 9.0 m 左右, 天然孔隙比 0.76~1.22, 平均 1.36。由于堆积时间短, 易发生不均匀沉降, 工程性质较差, 不宜直接作为路基的持力层, 见图 1。

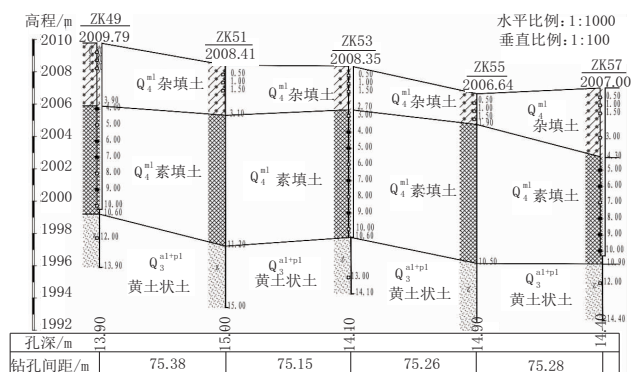


图 1 试验场地部分段落地质剖面图(单位:m)

拟建道路沿线的①₋₂ 层素填土、②₋₁ 层黄土状土均具有湿陷性, 湿陷系数 0.022~0.136, 湿陷程度为轻微-强烈, 湿陷深度 6.7~12.5 m, 湿陷厚度 1.8~

11.7 m, 湿陷等级属 II 级中等自重 ~ IV 级自重湿陷湿陷性场地。湿陷场地按《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中第 7.9.4 条及《湿陷性黄土地区建筑

标准》(GB 50025—2018)中第 6.3 条、6.4 规定,建议对该项目采用强夯、挤密桩(石灰桩、灰土桩)等方法进行压密加固处理,土力学参数见表 1。

表 1 试验场地地质情况土力学参数一览表

Table with 14 columns: 统计项目, 含水量 / %, 密度 / (g·cm⁻³), 干密度 / (g·cm⁻³), 比重, 天然隙比, 饱和度 / %, 液限 / %, 塑限 / %, 塑性指数, 液性指数, 压缩系数, 压缩模量 / MPa, 凝聚力 / MPa, 内摩擦角 / (°). Rows include 最大值, 最小值, 平均值, 标准值.

1.2 项目周边限制因素与设计方案

本工程道路设计等级为城市主干道, 设计车速 50 km/h, 为城市内部和周边联系主要的干线交通网络组成部分。

道路地下浅埋隧道工程已建设完成, 见图 2。同时周边的回填土已经填筑到设计路基标高, 回填土堆积时间短, 工程性质差。根据相关规范规定, 工程开始设计之前, 业主单位开展了工程范围内的检测报告编制, 由报告可知整个隧道两侧的回填的素填土和杂填土层, 压实度介于 78 ~ 92 之间, 且随深度变化明显, 实验室测得 CBR 值随深度变化也较大, 在 7.5 ~ 10 m 深度处存在极其不稳定的土质层。因为部分雨水管道破损, 部分区域天然含水率达到 22%, 整体路基状况极差, 见表 2、表 3。

表 3 工程范围内竣工验收随深度变化情况表

Table with 5 columns: 竣工验收指标, 浅表, -2.5, -5.0, -7.5, -10.0. Rows include 桩间土压实度 / %, 地基承载力 / kPa.

13 m, 桩径 0.4 m, 桩间距 0.8 m, 工艺采用先沉管开孔, 后加灰土挤密的方案。挤密后分层填筑 80 cm 12% 石灰土整平, 压实后填筑道路结构层。

灰土挤密桩验收主要指标如下: 桩间土压实度(瑞利波法测试校核)、路床地基承载力, 见表 2。

施工进场后着手进行试桩, 为了更好地研究桩径、桩间距、灰土掺量、挤密能量等级与最后验收工程的控制指标的桩间土压实度、复合地基承载力、瑞利波法测试结果的相关对应参数关系, 提出了正交试验的试桩方案。

2 灰土挤密桩与正交实验方案的制定

根据正交试验的相关需求, 结合本项目的实际情况, 我们确定了最终的 L9(3⁴) 正交试验方案[6]。本次方案总计需要进行 9 次试桩试验, 主要考核的影响因子包括灰土桩灰土掺量(A)、灰土桩桩径(B)、灰土桩桩间距(C)、灰土桩击实能量(D)。每个影响因子包含三个水平[7], 具体参数见表 4。

最终的验收结论指标确定以下三个: 桩间土压实度(0 ~ 10 m 深度, 间距 2.5 m, 数据采集点数 5 组, 钻芯取样法)、瑞利波法测试结果(0 ~ 10 m 深度, 间距 2.5 m, 数据采集点数 5 组)、复合地基承载力参数(仅测试褥垫层表层土参数)。

3 正交实验结果分析

3.1 各个深度处的桩间土压实度参数分析

根据 9 组实验的试桩结果, 结合表 5 和图 3 内容可以得出如下结论:

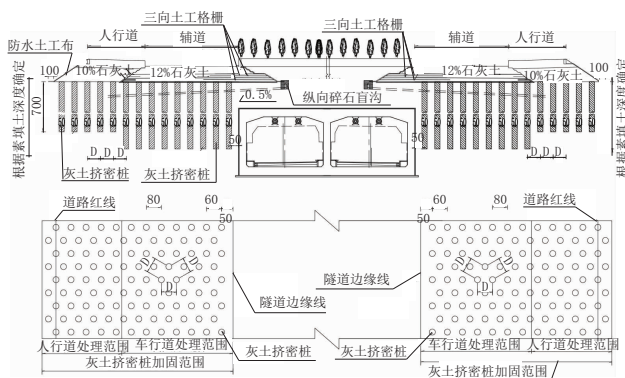


图 2 试验场地灰土挤密桩设计方案与隧道限制情况示意图(单位:cm)

表 2 工程范围内预检测随深度变化情况表

Table with 6 columns: 预检测指标, 浅表, -2.5, -5.0, -7.5, -10.0. Rows include 压实度 / %, CBR 值 / %.

设计方案认为优先采用灰土挤密桩对路基进行处理, 处理范围为道路红线外 1.2 m 至隧道边线 2 m 范围。灰土挤密桩采用 2 : 8(10%) 石灰土, 桩长 8 ~

表4 正交实验方案因素与水平情况选择详表

试验编号	灰土桩灰土掺量(A)/%	灰土桩桩径(B)/m	灰土桩桩间距(C)/m	灰土桩击实能量(D)/(kN·m)
1	10	0.4	0.8	480
2	10	0.5	1.0	540
3	10	0.6	1.2	700
4	12	0.4	1.0	700
5	12	0.5	1.2	480
6	12	0.6	0.8	540
7	14	0.4	1.2	540
8	14	0.5	0.8	700
9	14	0.6	1.0	480

注:1.灰土掺加比例为质量比(一般10%为2:8灰土,12%~14%为3:7灰土)。

2.灰土桩径为桩体直径。

表5 正交实验结果极差分析表(桩间土压实度参数)

采集深度/m	均值与极差值	桩间土压实度/%				最优组合
		(A)	(B)	(C)	(D)	
浅表	均值 M1	94.5	94.0	94.8	93.8	
	均值 M2	93.4	93.9	94.1	93.5	
	均值 M3	94.2	94.1	93.1	94.8	
	极差值 R	1.1	0.2	1.7	1.3	A1B3C1D3
-2.5	均值 M1	93.1	94.0	95.2	93.2	
	均值 M2	93.5	93.9	94.8	94.0	
	均值 M3	93.8	94.8	93.0	95.3	
	极差值 R	0.6	0.8	2.3	2.0	A3B3C1D3
-5.0	均值 M1	95.5	93.2	95.4	92.5	
	均值 M2	95.1	93.1	94.4	94.0	
	均值 M3	96.2	94.0	93.0	96.0	
	极差值 R	0.8	0.9	2.3	3.5	A3B3C1D3
-7.5	均值 M1	93.0	93.2	96.6	92.4	
	均值 M2	94.0	93.0	94.8	95.1	
	均值 M3	96.2	94.7	94.6	96.2	
	极差值 R	3.2	1.7	2.0	3.8	A3B3C1D3
-10.0	均值 M1	93.0	93.1	95.1	94.0	
	均值 M2	94.2	94.1	94.2	95.3	
	均值 M3	95.5	93.2	93.0	96.0	
	极差值 R	2.5	1.0	2.2	2.0	A3B3C1D3

浅表层极差值^[7]R:C>D>A>B,最优组合为A1B3C1D3,可知主要显著性影响因素为灰土挤密桩的间距和桩体填灰后的挤密能量。灰土桩径和桩体的灰土掺量相应影响较小,特别是灰土掺量因素M均值几乎相等,这也说明了灰土桩灰土掺量因素对于浅表层的压实度影响极其微小。

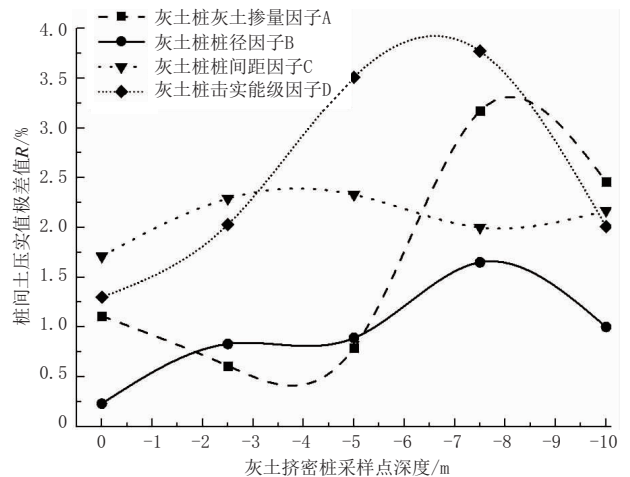


图3 四个因子的压实度极差值各个深度曲(单位:%)

(0~5 m 土层)极差值 R:C>D>B>A,最优组合仍然为 A3B3C1D3,可知本层位主要显著性影响因素仍然为灰土挤密桩的间距和桩体填灰后的挤密能量。灰土桩径和桩体的灰土掺量相应的影响效果趋同。考虑应该是本层位含水量增大后,石灰掺量或者桩体桩径增大对地基稳定性产生了积极影响。

(5~10 m 土层)极差值 R:D>A>C>B,最优组合仍然为 A3B3C1D3,可知本层位主要显著性影响因素变化为灰土桩灰土掺量和灰土桩击实能量,桩径和桩体间距成为次要影响因素。考虑应该与地质情况有关,表层土经过2 a多沉降已经相对稳定,而深层土孔隙比和含水率仍然很大。在较大的挤密能级的情况下,灰土桩在本层位扩孔比例加大,加之本层位土体原始压实度很小,400 mm 桩径有时能扩孔至600 mm 以上。所以A和D的影响在本层位起到决定性作用。

3.2 各个深度处的瑞利波法测试结果参数分析

根据9组试桩实验的瑞利波法测试结果,结合对表6、图4的分析可以得出如下结论:针对瑞利波法测试的结果,各个深度处最优组合均为A3B3C1D3。总体极差值R:(C,D)>(A,B),尤其在中间深度处,C、D影响因子影响显著性明显高于A、B因子,考虑仍然为灰土桩在本层位扩孔后桩径加大,使得原有土体压实度发生了巨大的变化所致。

另外,无论是桩间土压实度还是瑞利波法测试结果,在深度为5~10 m 深度处均有很大的极差值,可以得出结论:在原状土密实度较小且含水量较大层位,桩间距减少,增加挤密能量级别,将可以获得较好的扩孔效果,从而增加桩基础深层的密实度和稳定性。

3.3 复合地基承载力结果参数分析

根据9组试桩实验的复合地基承载力测试结

表6 正交实验结果极差分析表(瑞利波法测试)

采集深度/m	均值与极差值	瑞利波法测试/(m·s ⁻¹)				最优组合
		(A)	(B)	(C)	(D)	
浅表	均值 M1	255	214	284	209	A3B3C1D3
	均值 M2	269	266	257	222	
	均值 M3	296	281	207	296	
	极差值 R	41	67	77	87	
-2.5	均值 M1	242	207	304	269	A3B3C1D3
	均值 M2	269	280	244	233	
	均值 M3	296	311	216	303	
	极差值 R	54	104	88	70	
-5.0	均值 M1	243	201	319	209	A3B3C1D3
	均值 M2	249	263	294	304	
	均值 M3	309	299	211	311	
	极差值 R	66	98	108	102	
-7.5	均值 M1	253	217	335	211	A3B3C1D3
	均值 M2	268	251	259	255	
	均值 M3	333	329	203	332	
	极差值 R	80	112	132	121	
-10.0	均值 M1	213	204	296	245	A3B3C1D3
	均值 M2	290	277	263	266	
	均值 M3	297	299	213	301	
	极差值 R	84	95	83	56	

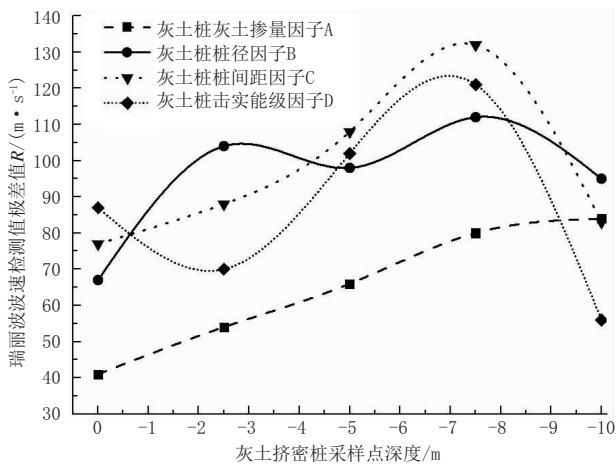


图4 四个因子的瑞利波检测极差值各个深度曲线(单位:m/s)

果,结合表7的内容可知以复合地基承载力作为验收指标的前提下,整体最优组合仍为A3B3C1D3,总体极差值R:C>B>A>D。考虑主要原因应为复合地基承载力均为褥垫层以上的承载力值,灰土桩桩径B和灰土桩转间距C对复合地基承载力有很强的相关性和显著性。所以,一般建筑地基对于承载力要求更高的工况下,宜采用大桩径和小桩间距的工程方案,而市政道路基础工程中承载力要求不高,对深

层土密实效果要求更高,建议可以采用小桩径填灰扩孔方案。

表7 正交实验结果极差分析表(复合地基承载力参数)

采集深度/m	均值与极差值	复合地基承载力/kPa				最优组合
		(A)	(B)	(C)	(D)	
浅表	均值 M1	196	184	308	206	A3B3C1D3
	均值 M2	252	231	215	255	
	均值 M3	249	282	174	256	
	极差值 R	57	97	133	50	

4 设计方案研究

综合以上正交实验分析结果,A3B3C1D3为最优组合方案,用于最终设计成果最为合理。但是由压实度和瑞利波检测的相关数据可以得出桩体石灰掺量对验收结果影响不大。且在深层位置通过增加挤密能级能够很好的弥补桩径小和桩间距大带来的不足。因此考虑经济性评价后最终确定施工方案为:钻孔直径400mm,桩间距80cm,灰土采用2:8灰土(10%),挤密能量确定为700kN·m。

最终方案施工完成后检测结果与以上实验数据分析基本一致。深度为-7.5m位置桩间土压实度和实验数据完全吻合,压实度达到了95%以上,高于其他深度处指标。证明该深度处击实扩孔程度加大,灰土挤压原始软弱土体,处理效果最为明显,出现峰值。其他各个深度处桩间土压实度均大于93%,完全满足设计参数需求。用瑞利波测量进行验证也得到了相同的结论。所以设计方案采用的A3B3C1D3组合方案造价居中,但是取得了很好的工程效果和经济效益,见表8。

表8 最终方案施工实试验收参数均值汇总表

验收指标采集深度/m	桩间土压实度/%	瑞利波法测试波速/(m·s ⁻¹)	复合地基承载力/kPa
0	94.2	286	
-2.5	93.4	289	
-5.0	94.2	291	252
-7.5	95.1	331	
-10.0	94.1	299	

5 结论

通过本次正交实验方法对灰土挤密桩试桩方案进行研究,得出以下结论。

(1)灰土桩灰土掺量因素对于浅表层的压实度检测指标没有正相关性。含水量不太大的情况下2:8灰土(10%)最为经济合理。

(下转第46页)

为提高耐久性、减少维护次数和成本,该桥采用了一系列如下的新工艺新材料及新技术:

a. 主缆及吊索钢丝涂层采用镀锌铝工艺,代替传统镀锌钢丝,具有更好的耐腐蚀性。

b. 主缆外防腐采用氯磺化聚乙烯缠包带新材料,代替传统油漆防腐,解决了油漆寿命短、易开裂的问题,外防腐寿命可达 30 a 以上。

c. 梁端索导管的漏水问题一直是难以解决的问题,是导致锚头锈蚀,进而影响整个缆索的耐久性的最大因素。本桥采用了在索导管前端设置铝合金气囊防水的新技术,较好地解决了索导管的漏水问题,当前使用情况良好。

(5) 预应力承台

本项目与地铁 2 号线重叠,地铁区间盾构为倒 8 字形,位于桥梁中心线处,根据地铁部门要求,本项目桩基只能设置在盾构两侧,且间距不小于 16 m。有两种方案可解决横向布置问题:第一种为将基础和桥墩设置在两侧,上面采用大跨度盖梁的方案,但是由于桥面仅为 17.5 m,盖梁两侧会有多余部分露出,景观性差;第二种为在两基础间设置承台系梁,系梁上布置桥墩,这种方案下的桥墩盖梁可按常规布置,承台埋于地下,不影响景观,但是承台系梁需要设置预应力。经过综合比选,最后本桥采用了第二种方案设置预应力承台的方式,在不影响景观的前提下,完美地避开了地铁盾构,取得了较好的社会效益。需要注意的是,应加强承台的防水能力。

(6) 主塔造型设计

本项目位于上海浦东新区的川沙新市镇,主塔造型设计脱胎于川沙镇名居——黄炎培故居,名为川沙之脊,意在融入川沙历史之悠久,传达开放新城之力量(见图 8)。主塔造型简洁、美观且富有意境。



图 8 主塔造型演变

5 结 语

(1) 本文简要介绍了新太平桥的项目概况、美学设计、总体布置与结构设计、项目特点、技术难点及解决方法等情况。采用了一系列新技术、新材料、新工艺、新构造和新造型,解决了相应设计难题,以期作为同类桥型设计的参考。

(2) 新太平桥于 2008 年开工,2010 年竣工通车,克服了地铁 2 号线同期建设、拆迁等困难,历时 12 a,在各参建方的共同努力下,终于圆满完成建设任务。

参考文献:

- [1] JTG/T D65-05—2015,公路悬索桥设计规范[S].
- [2] CJJ 77—98,城市桥梁设计荷载标准[S].

(上接第 37 页)

(2) 在原状土密实度较小且含水量较大工况下,桩间距减少,增加挤密能量级别,可以获得较好的扩孔效果,进而增加桩基础深层的密实度和稳定性。

(3) 建筑工程的复合地基承载力验收标准为褥垫层以上的承载力值,灰土桩桩径 B 和灰土桩桩间距 C 对复合地基承载力有很强的相关性和显著性,其他因素相关性不明显;市政道路工程因为有管道基础的埋深影响,需要深层土体的压实效果,采用增大灰土桩击实能量级别的方案更为经济。

(4) 考虑湿陷性黄土一般构造较深,兼顾投资因素的前提下,适当的增大挤密夯击能量级别,通过扩孔被动增大桩径的方案能够产生更好的工程效果和

经济效益。

参考文献:

- [1] 德成,王中荣,李春秀.灰土挤密桩处理回填砂土施工难点解决及效果[J].勘察科学技术,2016(4):29-31,54.
- [2] 王宗文.灰土桩在处理湿陷性黄土地基中的应用与研究[J].施工技术,2015,44(增刊1):64-67.
- [3] 齐秀廷.夯扩挤密桩改良强湿陷性黄土地基试验研究[J].中外公路,2015,35(2):57-60.
- [4] 张苇,郑建峰,杜湧.多桩型复合地基在湿陷性黄土地区的应用[J].施工技术,2014,43(17):11-15.
- [5] 刘松玉.公路地基处理(第二版)[M].南京:东南大学出版社,2009.
- [6] 盛聚,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计(第二版)[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [7] 辛益军.方差分析与实验设计[M].北京:中国财政经济出版社,2001.