

灰土挤密桩加固湿陷性黄土地基效果分析

周勤帮, 段伟, 王凯, 王海宏, 陈克旭, 王景南

(甘肃祁通公路养护科技有限公司, 兰州 730030)

摘要: 为研究灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基的施工控制参数, 确保地基处理效果, 依托兰临高速公路湿陷性黄土地基处理工程, 通过现场取样及物理力学性质试验, 研究湿陷性黄土地基在加固前后的含水状态、孔隙特征、压缩特性、湿陷性等随空间分布变化规律, 运用圆孔扩张理论分析桩间土剪胀特性、初始应力对塑性区半径的影响。结果表明: 桩间土含水率随其与桩体距离的增大而增大, 而随深度增加而减小; 桩间土干密度、压缩模量随距桩体水平距离的增大而减小, 孔隙比的规律则相反; 在距桩身 0.7 m 半径范围内桩间土的湿陷性已消除; 塑性区半径随剪胀参数的增加而增大, 随深度的增大而减小。研究结果得出石灰掺量为 10%、桩径为 0.4 m 时, 灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基的合理桩间距宜取 1.3 m。

关键词: 黄土地基; 湿陷性; 灰土挤密桩; 挤密效果; 合理桩间距; 塑性区半径

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0238-09

黄土是第四纪时期干旱条件下的沉积物^[1], 由于特殊的生成环境而具有显著的结构性和湿陷性, 遇水浸湿后结构迅速破坏并产生湿陷变形, 影响工程构筑物的安全性和服役期限^[2-3]。因此, 在黄土地区开展工程建设时, 为防止产生较大的湿陷变形, 常采用强夯法、灰土挤密桩法、预浸水法等进行处理^[4-5]。其中, 灰土挤密桩具有就地取材、施工简单、以土治土、成本低廉等诸多优点^[6], 广泛应用于我国西北、华北和东北等地区。

灰土挤密桩是利用沉管入土成孔, 然后在孔内分层回填并夯实灰土而成。其加固机理为: 通过成孔和夯实填料时的挤密作用提高地基土的密实度, 同时, 成桩后石灰与桩间土发生化学反应形成灰土挤密桩复合地基, 使地基土湿陷性减弱、承载力得到提高。目前, 有关灰土挤密桩复合地基的研究有灰土的化学反应机制^[7]、桩体应力分析及挤密影响半径计算^[8]、灰土挤密桩优化设计与合理桩间距确定^[9]等方面。崔莹等^[10]考虑桩土变形协调条件, 采用统一强度理论, 得到灰土挤密桩复合地基的沉降变形与影响半径的关系。Li^[11]开展灰土挤密桩加固黄土地基效果试验研究, 发现灰土挤密桩处理后黄土地基干密度、黏聚力及抗剪强度显著提高。曹

黎娟等^[12]借鉴柱形孔扩张理论, 考虑中主应力及拉压屈服强度影响, 分析挤密成孔过程中孔周土体应力变化与塑性发展规律。邓彬等^[13]分析了 Duncan-Chang 模型在挤密桩弹性模量计算分析中的局限性, 通过室内试验及原理分析, 提出黄土成孔挤密模型并通过实例验证其合理性。聂庆科等^[14]通过现场试验揭示夯扩挤密桩处理湿陷性黄土地基的机理及影响范围和加固效果, 探讨合理的桩间距选取问题。米海珍和杨鹏^[15]通过现场试验, 研究桩孔填料、桩心距、处理深度、范围等对湿陷性黄土地基的处理效果的影响。朱彦鹏等^[16]通过现场浸水试验研究挤密桩复合地基在浸水条件下的水分入渗规律及沉降变形特征。李华伟^[17]研究了夯扩素土挤密桩处理湿陷性黄土的加固效果。单超等^[18]采用三维数值模拟方法, 研究了黄土隧道在灰土挤密桩加固前后的变形特征和力学响应, 发现灰土挤密桩可提高黄土隧道底部的承载力和抗变形能力。于贵等^[19]用数值模拟方法对桩径、桩距、桩长等因素影响灰土挤密桩加固铁路路基的加固效果及工后沉降进行了研究。

现有研究对灰土桩处理地基的作用机制及处理效果做了大量探讨, 但在不同地区、不同场地, 仍

收稿日期: 2024-02-05

作者简介: 周勤帮(1982—), 男, 甘肃高台人, 高级工程师, 研究方向为路基路面施工技术; 段伟(1985—), 女, 甘肃武威人, 高级工程师, 研究方向为交通土建工程; 王凯(1978—), 男, 辽宁辽阳人, 高级工程师, 研究方向为项目施工管理; 王海宏(1979—), 男, 甘肃平凉人, 高级工程师, 研究方向为公路工程施工技术; 陈克旭(1986—), 男, 甘肃兰州人, 工程师, 研究方向为公路工程施工; 王景南(1985—), 男, 甘肃景泰人, 高级工程师, 研究方向为公路工程试验检测。

有必要对灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基的施工工艺及控制参数做进一步研究。本文依托兰临高速公路湿陷性黄土地基处理工程,结合试验测试与理论计算,研究桩间土含水率、干密度、孔隙比、压缩性和湿陷系数随深度和水平距离的分布规律,分析灰土挤密桩对湿陷性黄土地基的处理效果,并给出了合理桩间距计算方法和本次试验场地桩间距推荐值,以期为该地区类似工程建设提供参考。

1 工程背景及现场取样分析

1.1 工程背景

兰临高速公路是兰(兰州)海(海口)国家高速公路(G75)在甘肃境内的重要组成部分,路线全长92.69 km,是兰州南出口通往临洮的捷径,对促进两地经济社会发展具有重要意义。兰临高速公路大部分路线均经过湿陷性黄土地层,解决湿陷性是地基处理的首要问题。因而本文选取用灰土挤密桩处理湿陷性黄土路基某区间,以含水率、干密度、孔隙比和湿陷系数等为表征参数,分析灰土挤密桩对湿陷性黄土地基的挤密作用和加固效果,并对灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基的施工工艺及控制参数进行研究。

试验现场用掺量10%的灰土挤密桩进行加固。桩孔按正三角形布置,桩间距1.8 m,桩直径 $d=0.4$ m,桩长6 m,灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基示意图如图1所示。分别对天然地基土、桩身土以及距离灰土桩心距为 $r_1=0.3$ m、 $r_2=0.7$ m和 $r_3=1.0$ m位置的桩间土进行取样,取样范围从地面起向下1 m开始,至6 m深度结束,取样间隔1 m,每个取样点均取3个土样,以三者所得各参数平均值为该点土样的代表值。土样取样位置如图2所示。

1.2 地层物理力学指标

该路段黄土属 Q_4 黄土,呈黄褐色,土质均匀。通过室内土工试验,测得物理力学指标见表1,粒径级配曲线如图3所示。根据轻型击实试验得到最优含水率为14.9%,最大干密度为 1.76 g/cm³。

表1 天然黄土物理力学指标

深度 z/m	含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	自重湿陷系数 δ_{zs}
1	13.2	1.37	0.72	0.012
2	13.5	1.30	0.93	0.025
3	12.4	1.32	0.95	0.025
4	12.2	1.31	1.03	0.026
5	10.1	1.36	1.03	0.040
6	11.2	1.35	1.08	0.046

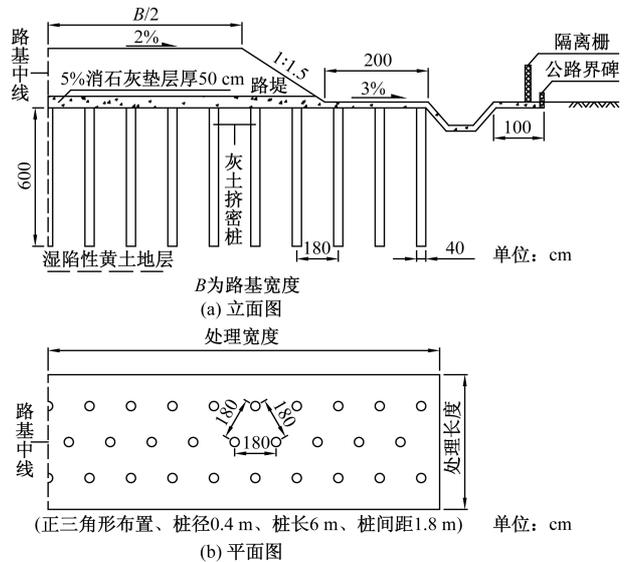


图1 灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基示意图

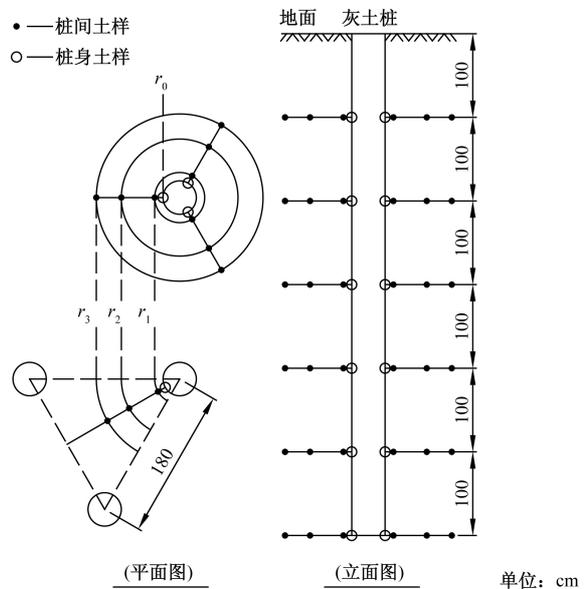


图2 土样取样点位置

2 试验结果分析

2.1 含水率分析

在湿陷性黄土地区的灰土挤密桩复合地基,桩身土含有石灰且桩间土为湿陷性土,二者对水分的含量和分布极其敏感,所以桩身土和桩间土的含水状态对地基承载力有重要影响,因此有必要对二者的含水率进行分析。本文依据桩身土样和同一深度不同半径处桩间土样的测试结果绘制含水率分布图,如图4所示。可以看出,随着深度增加,桩身土和桩间土含水率均呈现减小趋势,原因是灰土挤密桩加固地基时,在成桩后灰土与水发生物理化学反应,消耗一定量的

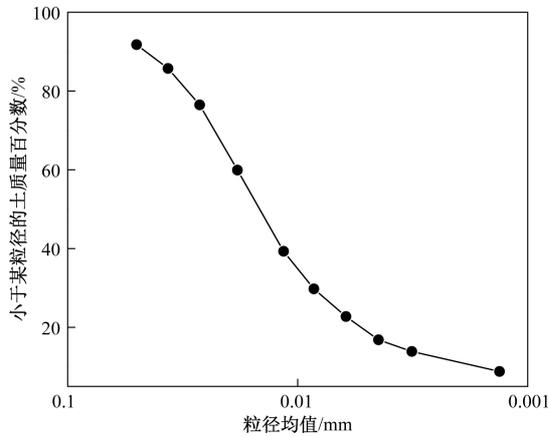


图 3 粒径级配曲线

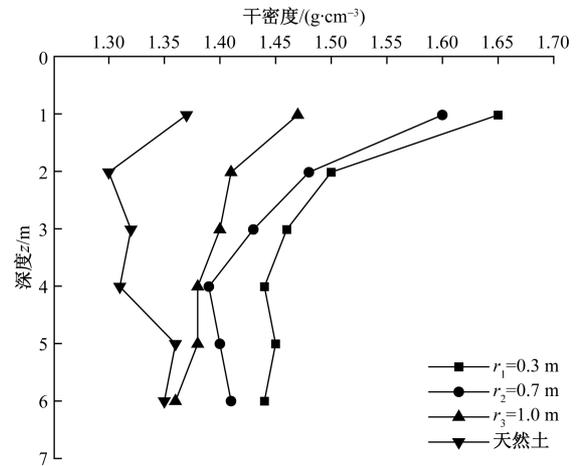


图 5 干密度随深度变化曲线

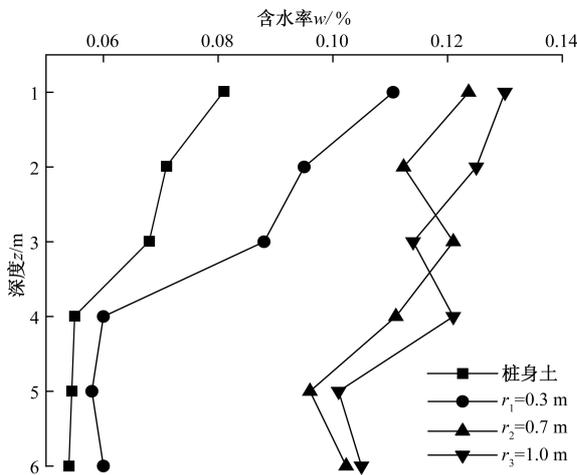


图 4 灰土桩复合地基含水率随深度变化曲线

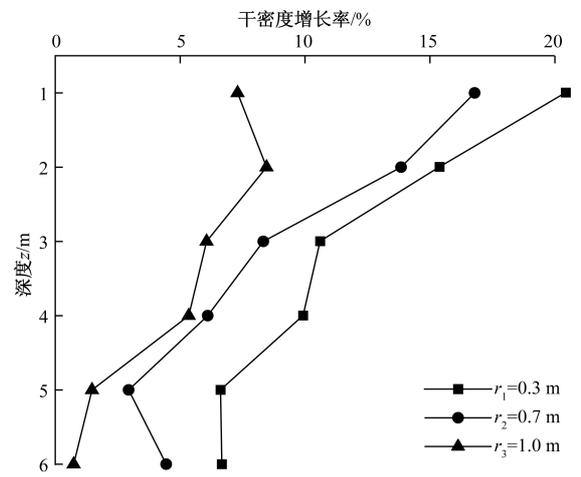


图 6 干密度增长率随深度变化曲线

水分,导致桩身土含水率下降,又灰土桩是发生石灰与水反应的主体,因此桩身土含水率在整个复合地基中为最低;越靠近桩身的土层含水率越低,其原因是桩身灰土吸收距离其一定范围内地基土的水分^[20],距离越近则失水越多,含水率越小。

2.2 干密度分析

干密度是土中孔隙在完全没有水时的密度,可以反映土的孔隙比,其值大小对土体的持水性能有显著影响。提高地基土的干密度(压实度)可有效改善地基土的持水性能,提高地基强度和抗变形能力。根据试验结果绘制天然土样和距离桩心不同半径处桩间土样干密度沿深度变化曲线,如图 5 所示,并绘制干密度增长率^[16]随深度变化曲线[干密度增长率=(加固后干密度-加固前干密度)/加固前干密度×100%],如图 6 所示。结合图 5、图 6 可以看出,加固前天然土层的干密度随深度变化幅度小,且整体分布较为均匀,而加固后桩间土的干密

度均随深度的增大而减小;距离灰土桩越近的土层干密度增长率越大;加固后桩间土的干密度明显大于加固前天然地基土的干密度,且按每一深度土层的对比看,越靠近地面,干密度提高的程度越大,如深度 1 m 处, r_1 、 r_2 、 r_3 位置的桩间土干密度分别为 1.65、1.60、1.47 g/cm^3 , 相比该处天然地基土 (1.37 g/cm^3) 干密度增长率分别为 20.44%、16.79%、7.30%,再如深度 3 m 处, r_1 、 r_2 、 r_3 位置的桩间土干密度分别为 1.46、1.43g、1.40 g/cm^3 , 相比该处天然地基土 (1.32 g/cm^3) 干密度增长率分别为 10.61%、8.33%、6.06%。

成孔和夯实填料两个过程中的挤密作用使地基土的密实度显著提高,干密度大幅增加;同时由于施工机械在地表作业,机械的自重荷载对地基土有一定压实作用,加之成孔施工作业过程均是从地表开始,地表土层所受扰动作用强于深层土体,使其干密增长率更甚于下部土体;另据柱形孔扩张理论可知,桩以外的土层依次可划分为塑性区和弹性区,塑性区挤密

效果较好^[21],因而越靠近桩的土层干密度提高幅度越大,加固效果也越好^[22]。据此分析可知,该场地的天然土层经过灰土桩挤密加固后,自桩周至距离桩心半径为 0.7 m 范围内的土层干密度增长率平均值在 10% 左右,受到挤密作用较强,土体干密度显著提高,压缩性大幅降低,地基承载力进一步提高;距离桩心 0.7 m 以外的土层受到桩体的挤密作用明显减弱,干密度增长率已不足 9%。按以上分析,从干密度的变化规律可以得出,本试验中灰土挤密桩对地基的有效加固范围是距离桩心半径为 0.7 m 以内的土体。

2.3 孔隙比分析

孔隙比是土体中孔隙体积与固体颗粒体积之比,是一项表达土体结构特征的指标,孔隙比越小,则土越密实,压缩性越低,反之亦然。根据试验测试结果绘制孔隙比随深度变化曲线,如图 7 所示,另外结合试验结果提出“孔隙比降低率”这一指标来反映地基土的孔隙比变化特性,并绘制孔隙比降低率[孔隙比降低率=(加固前孔隙比-加固后孔隙比)/加固后孔隙比×100%]随深度变化曲线,如图 8 所示。综合图 7、图 8 可知,同一深度的土层,距离桩身越近,孔隙比越小,随着距离桩身越远,孔隙比逐渐增大,但总体上仍呈现出加固后地基的孔隙比均小于天然土;同一半径位置处的土层,随着深度的增加,孔隙比呈线性增大;不同深度和不同半径位置处土层的孔隙比,经灰土桩挤密加固后均降低了一定的比率,以前文所提的孔隙比降低率衡量,如深度为 1 m 处, r_1 、 r_2 、 r_3 位置的桩间土孔隙比分别为 0.60、0.64、0.72,相比该处天然地基土(0.85)孔隙比降低率分别为 41.67%、32.81%、18.16%,再如深度 4 m 处, r_1 、 r_2 、 r_3 位置的桩间土孔隙比分别为 0.82、0.88、0.96,相比该处天然地基土孔隙比(1.03)降低率分别为 25.61%、17.05%、7.29%。

据以上分析可知,距离桩身越近的土体挤密效果越好,在 r_1 、 r_2 、 r_3 各半径的桩间土孔隙比降低率分别为 33.23%、16.40%、6.12%,说明在以桩身为中心,在半径 r_2 (0.7 m) 范围内,孔隙比减小量效果可观,孔隙比降低率较大,土体得到了显著的挤密作用,而半径为 r_2 (0.7 m) 范围以外的土体孔隙比降低率已较小,受桩体挤密效果不再明显。因而按干密度的变化规律可以得出:灰土挤密桩可有效加固半径 0.7 m 范围内桩间土。

2.4 压缩性分析

2.4.1 压缩曲线

土的压缩性是土在受压时体积压缩变形的特

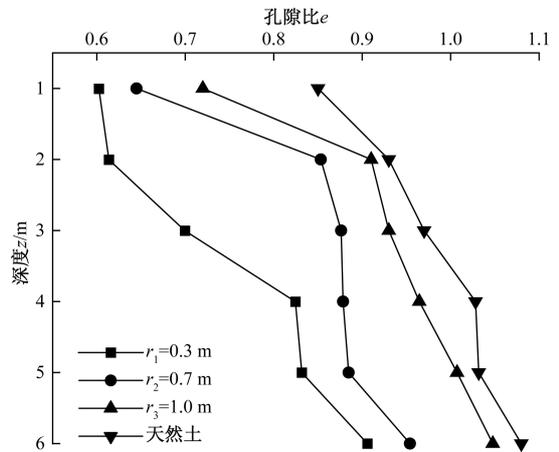


图 7 孔隙比随深度变化曲线

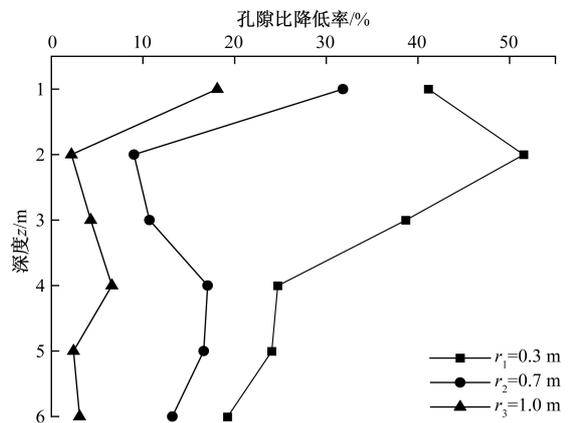


图 8 孔隙比降低率随深度变化曲线

性,其实质是土中孔隙的体积被压缩引起的,土的压缩性直接影响地基的变形和强度。根据《土工试验方法标准》^[23]对桩间土开展标准固结试验,按照式(1)求得各级荷载 p_i 下的孔隙比 e_i ,得到 r_1 、 r_2 、 r_3 半径上不同深度处桩间土层的 $e-p$ 曲线,如图 9 所示。

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \quad (1)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; h_0 为试样初始高度,cm; $\sum \Delta h_i$ 为压力 p_i 下试样高度总变形量,cm。

根据图 9 可知:在各级荷载下,桩间土样孔隙比均随深度的增大而增加,桩身所在深度范围内土层均得到了有效的挤密作用,且挤密效果较均匀良好,逐级荷载的施加都如同将“孔隙比随深度变化曲线”在“孔隙比”坐标轴沿其减小方向做了平移;同一深度上不同半径处的土样,其孔隙比随距离桩心半径的增大而增加,可见地基土所受挤密效果与其距离桩身的距离呈负相关,靠近桩身的土层所受

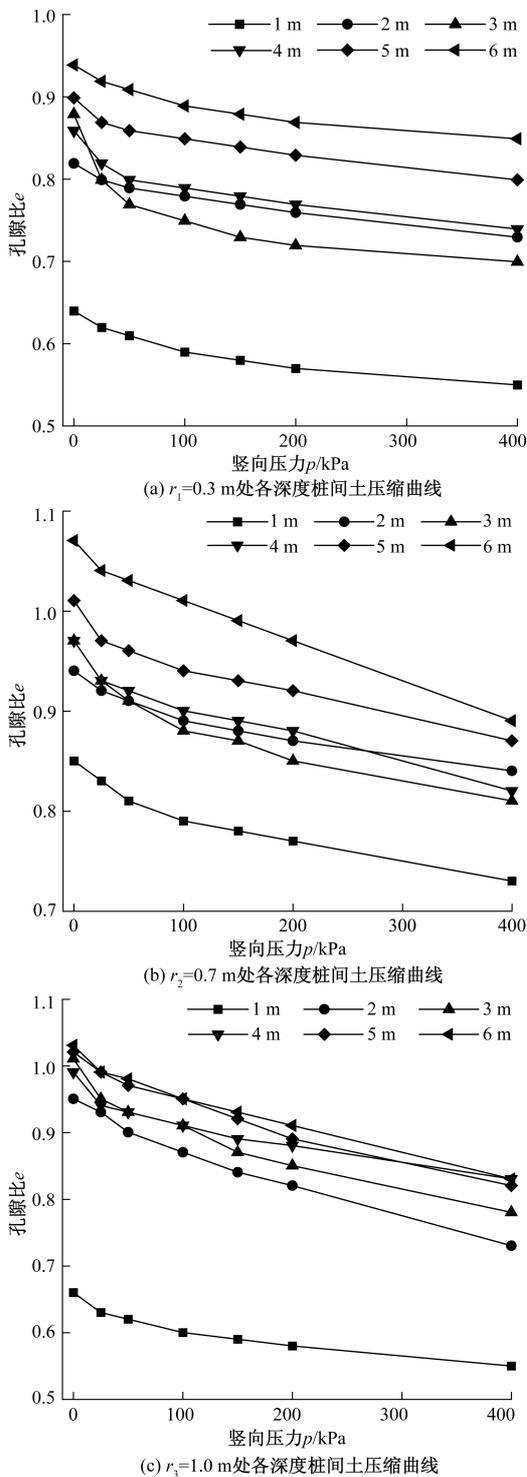


图 9 桩间土压缩曲线

挤密效果最佳,越远则逐渐减弱;在 r_1 、 r_2 、 r_3 半径处,地表土层(深度 1 m 处)的孔隙比均明显小于同半径位置上其他深度的土样,其原因一方面是由于施工机具的作业大都在地表开展,机具的自重荷载已使浅层土体发生压缩,另一方面因地表土体上面临空,不同于深层土体在各个方向上均受约束,其只

受四周和下部土体的约束,因而成孔和回填两个过程对地表浅层土体的扰动作用使得其所产生的(受挤密)反应也强于深层土体,所以其密实度也显著高于深层土体,反映在图 9 中即是地表土层(深度 1 m 处)的压缩曲线明显远离其他深度土层的压缩曲线。

2.4.2 压缩模量

将 2.4.1 节中压力荷载从 100~150 kPa 阶段所得孔隙比 e_i 结果代入式(2)计算桩间土在该荷载等级内的压缩系数 a_v ,再将其代入式(3)求得桩间土压缩模量 E_s 。

$$a_v = -\frac{e_{i+1} - e_i}{p_{i+1} - p_i} \quad (2)$$

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (3)$$

选取 3 根灰土桩所在范围内的桩间土,将其压缩模量 E_s 在地基中桩长范围内的空间分布绘制成等高线图,如图 10 所示,图中白色圆圈即为灰土桩所在位置。

由图 10 可知,灰土挤密桩可对桩间土产生显著挤密作用,压缩模量得到不同程度的提高,距离桩体越近,压缩模量提高的幅度越大,反之则越小;加固效果最显著的是图中红色区域(即以桩身为中心,半径小于 0.7 m 范围),该区域内土层压缩模量为 7~9 MPa,并在与桩侧(图 10 中深红色)接触位置达到最大,另外根据文献[10],灰土桩复合地基受荷后,沿桩孔向外依次产生塑性区和弹性区,土体的有效挤密压缩变形发生在塑性区内,弹性区仍处于弹性平衡状态,试验结果中红色区域处于塑性状态,与文献[10]的观点基本一致;半径大于 0.7 m 范围,即图中的黄色至紫色所包含范围的全部区域

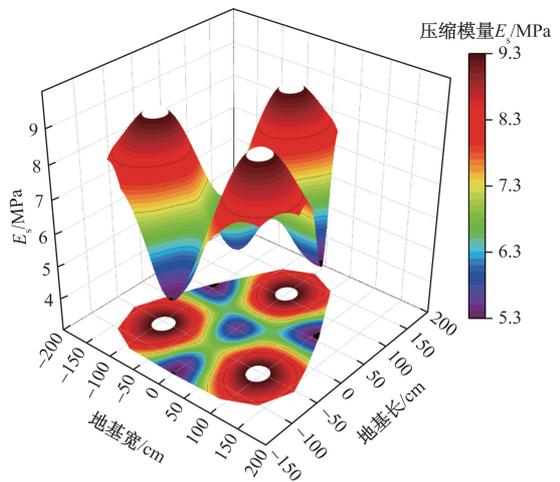


图 10 桩间土压缩模量等高线图

都是弹性区,土体还处于弹性状态,所受挤密作用不再明显,压缩模量仅略大于原地层,范围为5~7 MPa。综上可知,灰土桩加固湿陷性黄土地基可有效提高距桩心0.7m半径范围内地基土的压缩模量。

2.5 湿陷性分析

湿陷性黄土具有结构疏松、孔隙发育、土质均匀等特点,在受水浸湿后,其强度和结构都会因此发生巨大变化。衡量黄土湿陷性的力学参数为湿陷系数。根据《土工试验方法标准》^[23]开展双线法试验,按照式(4)计算天然地基土样、灰土桩加固后桩间土各位置土样的自重湿陷系数,将所得不同半径处的自重湿陷系数绘制其随深度变化曲线,如图11所示。

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h'_z}{h_0} \quad (4)$$

式中: δ_{zs} 为自重湿陷系数; h_z 为饱和自重压力下试样变形稳定后高度,cm; h'_z 为饱和自重压力下试样浸水湿陷变形稳定后高度,cm。

由图11可知,天然地基自重湿陷系数为0.012~0.046,随深度增加而增大,地表至深度1m范围内,土体的自重湿陷系数小于0.015,没有湿陷性,其余深度内土层均大于0.015,具有不同程度的湿陷性;经灰土挤密桩处理后,距桩心半径为0.7m范围内的桩间土自重湿陷系数随深度增加而增大,但各深度处已均小于0.015,表明本次地基处理使其湿陷性消除;地基处理后,距离桩心半径为1.0m处的桩间土,当深度大于3m时湿陷系数已大于0.015,并随深度的增大呈增长趋势,该半径范围的桩间土仅有浅层土体湿陷性消除。因此可以得出:距桩体越近,桩间土受到的挤密效应越强;距离地表

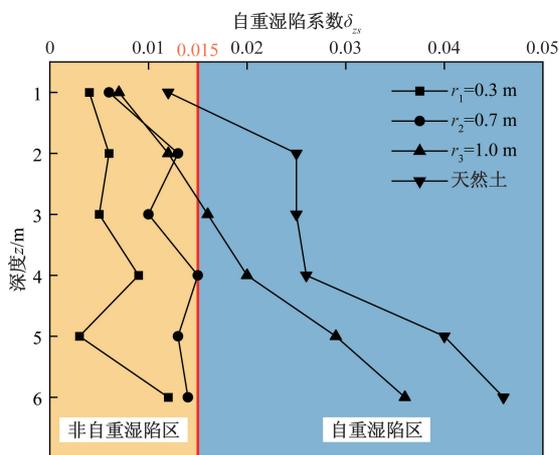


图11 自重湿陷系数随深度变化曲线

越近,桩间土受到的挤密效应越强;半径在0.7m范围内的桩间土湿陷性完全消除。

3 合理桩间距分析

灰土挤密桩间距的设置方式会直接影响工程投入成本和地基处理效果。间距过大会导致桩与桩之间荷载分担不均匀,增加土体侧向位移和桩身变形,影响灰土桩复合地基承载力;而间距太小则会增加工程用桩量,增加成本投入。当然除了桩间距,桩径和桩长等参数也会对其承载能力产生影响。为达到最佳地基处理效果,灰土挤密桩的设计需要综合考虑多种因素,但能否获得合理的桩间距设计仍然起主导作用。因此本文以下内容主要对合理桩间距进行讨论和分析。

3.1 规范方法计算

依据《湿陷性黄土地区建筑标准》(以下称《标准》)6.4节^[24]相关内容,灰土挤密桩的孔位按正三角形布置时桩间距可按式(5)计算桩间距,即

$$L = 0.95d_p \sqrt{\frac{\bar{\eta}_c \rho_{\max}}{\eta_c \rho_{\max} - \rho_{d0}}} \quad (5)$$

式中: L 为桩孔中心之间的距离,m; d_p 为桩孔直径,m; ρ_{\max} 为桩间土的最大干密度, t/m^3 ; ρ_{d0} 为地基处理前土的平均干密度, t/m^3 ; $\bar{\eta}_c$ 为桩间土经成孔挤密后的平均挤密系数,《标准》要求其值不宜小于0.93。

本试验中灰土桩挤密桩桩径 d_p 为0.4m,地基土初始干密度 ρ_{d0} 为1.34 g/cm^3 ,最大干密度 ρ_{\max} 为1.76 g/cm^3 。将以上参数代入式(5),计算并绘制挤密系数与桩间距的关系曲线,如图12所示。

由图12可知,桩间土的挤密系数随桩间距增大呈指数减小,当桩间距为1.0m时,挤密系数为0.97,桩间距为1.15m时,挤密系数减小至0.95,

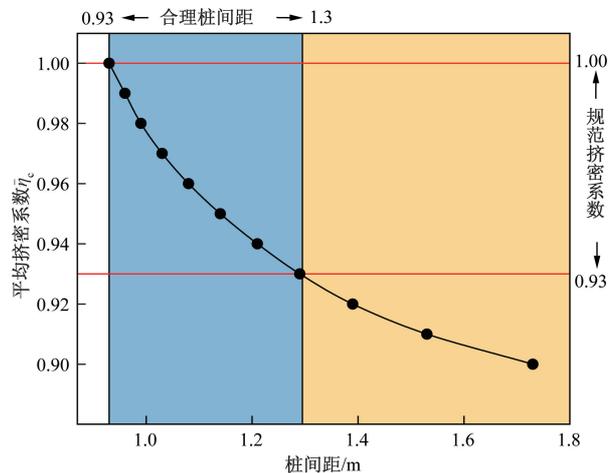


图12 平均挤密系数与桩间距的关系曲线

当桩间距为 1.3 m 时,挤密系数减小至 0.93,为规范最小值。根据《标准》要求,挤密系数 η_c 不宜小于 0.93,因此本场地桩间距设计值不宜大于 1.3 m。

3.2 基于广义 SMP 破坏准则的柱形孔扩张塑性区半径理论分析

灰土桩在挤密地基时,土体的变形主要沿桩周侧向发展,因而挤密成孔过程中桩周土体的受力分析可按平面应变问题考虑。桩间土的受力示意图如图 13 所示。

栾茂田和李波^[25-26]的研究,以小变形假设为前提,忽略体力,选取广义空间准滑动面(spatial mobilized plane, SMP)准则,采用弹塑性本构,求解扩孔半径与塑性区半径之间的关系,式(6)~式(9)为各参数具体表达式。

$$k^2 \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^2 - \frac{4kh}{h+1} \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^{\frac{1+h}{h}} + \frac{2k(h-1)}{h+1} + 1 = 0 \quad (6)$$

$$k = \frac{(1+\mu)(R_{ps}-1)(\sigma_0+p_0)}{E R_{ps}+1} \quad (7)$$

$$R_{ps} = \frac{1}{4} (\sqrt{8\tan^2\varphi+9} + \sqrt{8\tan^2\varphi+6-2\sqrt{8\tan^2\varphi+9}-1})^2 \quad (8)$$

$$\sigma_0 = c/\tan\varphi \quad (9)$$

式中: k 为弹性模量 E 、泊松比 μ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及初始应力 p_0 确定的初始应力系数; R_{ps} 为土体屈服主应力比; σ_0 为平面应变下土体破坏时极限应力莫尔圆对应的黏结应力; h 为剪胀参数。

上述方法已较为精确地求解了塑性区半径,本文在该解法基础上,考虑体力作用,对初始应力进行调整,不再视初始应力 p_0 为常数,而是按地基的水平自重应力来考虑,其表述为

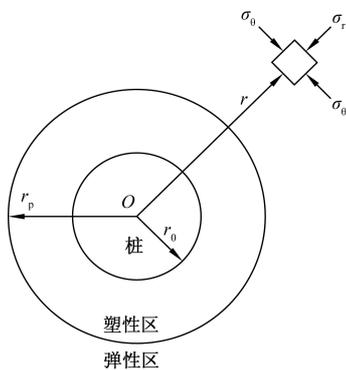


图 13 桩间土受力图

$$p_0 = K_0\sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu}\gamma z \quad (10)$$

式中: K_0 为土的侧压力系数; σ_z 为自重应力, kPa; γ 为天然重度, kN/m³; z 为应力点埋深, m。

当土体的强度参数与变形参数确定以后,式(7)~式(10)也随之确定,进而可得到式(6)中塑性区半径与扩孔半径之比 r_p/r_0 。在灰土桩半径 r_0 给定时,即可求得灰土挤密桩的塑性影响区半径,可为确定单根桩加固范围提供参考。

为说明剪胀特性、初始应力对塑性区半径的影响,对上述计算方法进行数值分析。地基深度仍按 6 m 考虑,选取场地土的物理力学参数,以弹性模量 $E=100$ MPa、泊松比 $\mu=0.4$ 、黏聚力 $c=15$ kPa、内摩擦角 $\varphi=25^\circ$ 和天然重度 $\gamma=15$ kN/m³ 代入式(7),得到初始应力系数 k 随深度的变化曲线,并将结果绘于图 14。另选取剪胀系数 h 的变化范围为 1~3,其余参数不变,将式(6)绘于图 15,得到剪胀特性和初始应力对塑性区半径的影响图。

从图 14 可以看出,初始应力系数 k 与深度呈线性正相关,自地表至埋深 6 m 处,初始应力系数 k 从 0.17 增长至 0.47,初始应力系数 k 随地基深度的增大而增大。由图 15 可知,当其余参数不变时,塑性区半径随剪胀参数的增加而扩大,说明土的剪胀特性对塑性区半径具有比较显著的影响,因此在用圆孔扩张理论进行分析时不可忽视剪胀效应的影响;当剪胀参数确定时,塑性区半径随初始应力系数 k 增大而减小,也即随地基深度的增大而减小,说明灰土桩对受其影响的桩间土的挤密作用随地层深度的增加而减小,说明水平自重应力对塑性区半径也有显著的影响,埋深越大,水平自重应力越大,塑性区半径则越小,反之亦然。另外,在确定了土性基本

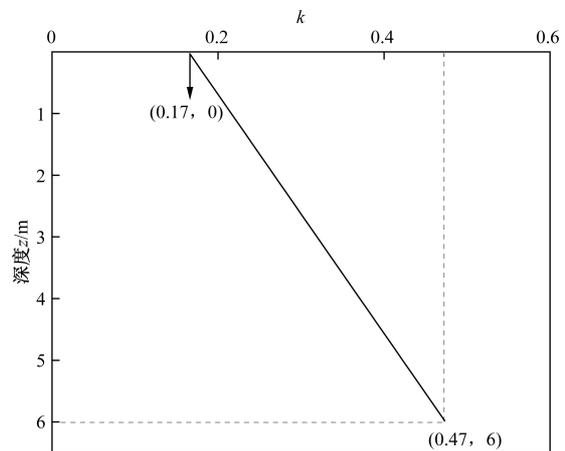


图 14 初始应力系数 k 随深度变化曲线

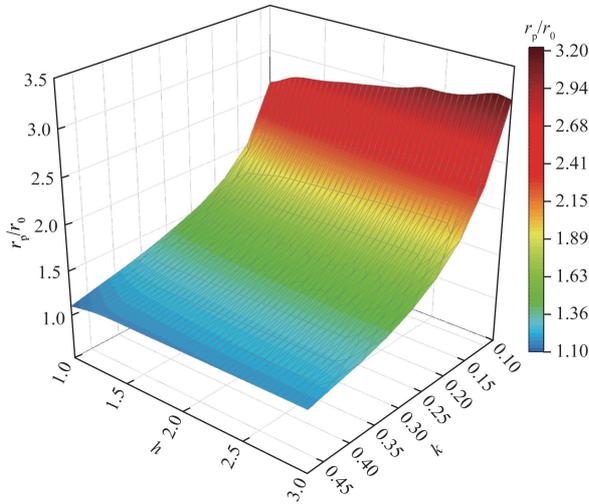


图 15 剪胀特性、初始应力对塑性区半径的影响

参数(E 、 μ 、 c 、 φ 、 h)后,通过上述计算方法能够得到塑性区半径与扩孔半径之比 r_p/r_0 具体数值,可以为灰土挤密桩设计确定合理桩间距提供一定参考。

4 结论

将桩间土取样进行基本参数测试和物理力学性质试验,并与天然地基土样的原各项指标对比分析,研究了桩间土的物理参数随深度和径向距离的变化规律,依据规范和理论解析对合理桩间距进行分析计算,得到了一种灰土挤密桩合理桩间距的计算方法,并得到以下结论。

(1) 桩间土含水率随其与桩身的距离增大而增大,随深度的增加而减小。在同一深度,桩间土干密度、压缩模量随着距桩身距离的增大而减小,而孔隙比则相反。

(2) 桩间土干密度均大于天然地基,相邻 3 个桩之间的中心位置处孔隙比最大。天然地基具有一定湿陷性,经灰土挤密桩处理后,桩身 0.7 m 半径范围内土体所受挤密效果显著,自重湿陷系数均小于 0.015,土层湿陷性消除。

(3) 桩间土塑性区半径随剪胀参数的增加而增大,但随地基深度的增大而减小,灰土桩的挤密效果随地层深度的增加而减弱,水平自重应力对塑性区半径也有显著的影响,埋深越大,塑性区半径则越小。

(4) 现场取样试验结果和计算结果均能反映桩间土的挤密效果随桩间距增大而呈减小趋势,而土层挤密系数的变化亦遵从相似的规律,结合现场试验结果、规范计算结果及基于广义 SMP 破坏准则并考虑体力作用的柱形孔扩张理论分析,当石灰掺

量为 10%、桩径为 0.4 m 时,灰土挤密桩桩间距应取其中的较小值,推荐为 1.3 m。

参考文献

- [1] 赵志强,戴福初,闵弘,等. 原状黄土-古土壤中水分入渗过程研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2611-2621.
- [2] 郑万鹏,窦晖,梁伟,等. 基于黄土微观结构演化的湿陷性机理研究[J]. 公路, 2023, 68(8): 322-325.
- [3] 徐西久,范江涛,袁可佳,等. 大厚度湿陷性黄土现场浸水试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(6): 849-857.
- [4] 龚贵林. 换填法与灰土挤密桩法处理湿陷性黄土地基试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [5] 徐文涛. 湿陷性黄土地基高能级增强夯试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [6] 赵均海,崔莹,张常光,等. 灰土挤密复合地基桩体极限承载力统一解[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(1): 125-131.
- [7] ZHANG F C, DONG J H, YANG X Y, et al. Study on the hydro-thermal-mechanical characteristics of the lime-soil compaction pile in the forming process[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 24: 1-9.
- [8] 何永强. 强湿陷性黄土地区挤密桩复合地基的理论分析与试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [9] 苗强强,张红雨,陈正汉,等. 基于遗传算法的湿陷性黄土地基灰土挤密桩优化设计[J]. 后勤工程学院学报, 2009, 25(3): 10-13.
- [10] 崔莹,赵均海,张常光,等. 基于统一强度理论的灰土桩复合地基挤密影响区半径计算[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1116-1120.
- [11] LI J S. Testing on loess collapse of expressway subgrade reinforced by lime-soil compaction piles[J]. Earth and Environmental Science, 2020, 525: 012025.
- [12] 曹黎娟,赵均海,魏雪英. 基于统一强度理论的灰土挤密桩应力分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1786-1790.
- [13] 邹彬,韩晓雷,戚明军. 黄土地区挤密桩桩周土体挤密模型的确定[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1158-1160.
- [14] 聂庆科,梁金国,韩立君,等. 夯扩桩加固湿陷性黄土地基机理研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1819-1823.
- [15] 米海珍,杨鹏. 挤密桩处理湿陷性黄土地基的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1951-1956.
- [16] 朱彦鹏,杜晓启,杨校辉,等. 挤密桩处理大厚度自重湿陷性黄土地区综合管廊地基及其工后浸水试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2914-2924.
- [17] 李华伟. 夯扩素土挤密桩处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 铁道建筑, 2008(3): 54-55.
- [18] 单超,甘露,王亚东,等. 灰土挤密桩加固黄土隧道受力与变形性状分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 86-95.
- [19] 于贵,李星,舒中文,等. 灰土桩加固既有铁路路基关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(11): 1-8.

- [20] 张玉, 何晖, 曾志英, 等. 粉煤灰-石灰改良黄土与压实黄土强度特性对比分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3265-3273.
- [21] 赵均海, 陈晨, 张常光. 非饱和土柱形孔扩张的统一弹塑性解[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 166-173.
- [22] 张世径, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和剩余湿陷量问题的合理控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 344-350.
- [23] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [24] 湿陷性黄土地区建筑标准: GB 50025—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [25] 栾茂田, 李波. 基于广义 SMP 破坏准则的柱形孔扩张问题理论分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2105-2110.
- [26] 李波, 栾茂田. 基于 SMP 破坏准则的柱形孔扩张问题理论分析[J]. 大连理工大学学报, 2006(2): 246-251.

Effect Analysis of Lime-soil Compaction Pile Reinforcing Collapsible Loess Foundation

ZHOU Qinbang, DUAN Wei, WANG Kai, WANG Haihong, CHEN Kexu, WANG Jingnan

(Gansu Changtong Highway Maintenance Technology Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to investigate the construction control parameters for treating collapsible loess foundation using lime-soil compaction piles and ensure the effectiveness of the treatment, focuses on the foundation treatment project of the Lan-Lin Expressway, through the physical and mechanical properties test studied the water content, pore characteristics, compression characteristics and collapsibility of collapsible loess foundation soil samples with spatial distribution before and after reinforcement, and the influence of dilatancy characteristics and initial stress on the radius of plastic zone was analyzed by using the theory of cavity expansion. The results indicate that moisture content in soil between piles increases with distance from piles but decreases with depth; dry density and compression modulus decrease with horizontal distance from piles, while porosity shows an opposite trend. collapsibility within a 0.7 m radius from pile bodies is eliminated, the radius of plastic zone increases with dilatancy parameter but decreases with depth increase. Results suggest that when lime content is 10% and pile diameter is 0.4 m, a reasonable spacing for lime-soil compaction piles treating collapsible loess foundation is 1.3 m.

Keywords: loess foundation; collapsibility; lime-soil compaction pile; compaction effect; reasonable pile spacing; radius of plastic zone