

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2022.04.023

高压旋喷桩复合地基桩土应力比特性研究

Study on pile-soil stress ratio characteristics of high pressure jet grouting pile composite foundation

李琦, 杜阳宏

(中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050000)

LI Qi, DU Yanghong

(China Hebei Construction & Geotechnical Investigation Group Ltd., Shijiazhuang 050000)

摘要: 高压旋喷桩复合地基具有施工工艺简便、适应土体类型能力强及地基处理效果好等优势。研究高压旋喷桩复合地基承载力特点时,必须考虑桩土应力比的变化情况。本文在研究高压旋喷桩复合地基荷载传递特性基础上,以某多层住宅项目6号楼地基处理工程为背景,通过现场钻芯取样和低应变检测获取数据,经数值模拟得到高压旋喷桩复合地基的基桩桩顶竖向应力变化曲线、桩间土竖向应力变化曲线及基桩和桩间土应力比变化曲线,从而分析桩土应力变化特性。

关键词: 高压旋喷桩;复合地基;桩土应力比

Abstract: The high-pressure jet grouting pile composite foundation has the advantages of simple construction technology, strong adaptability to soil types and good foundation treatment effect. In the research of bearing capacity of high-pressure jet grouting pile composite foundation, the variation of pile-soil stress ratio should be considered. Based on the study of load transfer characteristics of high-pressure jet grouting pile composite foundation, the original data are obtained through core drilling and low-strain testing in the foundation treatment project of a multi-story residential building. The vertical stress curve of pile top, the vertical stress curve of soil between piles and the stress ratio curve of pile and soil between piles are obtained by numerical simulation, so as to analyze the pile-soil stress change characteristic.

Key words: high pressure jet grouting pile; composite foundation; pile-soil stress ratio

中图分类号: TU473.1 文献标志码: B 文章编号: 1003-8965(2022)04-0083-03

1 高压旋喷桩复合地基桩土荷载传递特性

1.1 垫层调节基桩和桩间土所受荷载

桩顶受到的荷载传递到土体的过程有两个路径,第一个路径是通过基础或垫层将荷载传递给桩间土,第二个路径是通过基桩桩体将上部荷载传递给地基土,通过这两个传递路径,可成功实现桩和土共同承载上部结构荷载的目的。

当建筑结构竖向荷载作用在设有垫层的高压旋喷桩复合地基时,荷载会通过垫层调节后传递给基桩和桩间土。初始阶段由于上部结构刚开始建设,传递到垫层的荷载较小,垫层不会发生变形,且基桩和桩间土二者应力差也不大。随着上部结构的建设,垫层受到的荷载逐渐增大,加剧垫层的压缩变形,导致桩顶有刺入垫层的趋势,这时桩间土在上部荷载的作用下开始出现沉降变形,荷载作用力逐渐向基桩桩顶聚集,当上部荷载进一步增大时,基桩桩顶会出现应力集中现象,导致基桩桩体分担大部分荷载。当垫层压缩到极限,桩顶无法具备继续向上的刺入趋势,基桩桩体和桩间土的相对位移逐渐为零,这时基桩桩体和桩间土共同承载上部结构传递的荷载。如荷载超过了复合

地基的极限承载力,复合地基会发生破坏。如果高压旋喷桩复合地基没有设置垫层,当建筑结构上部荷载作用时,基桩和桩间土之间无法协调受力,会导致基桩桩顶过早出现应力集中现象,而桩间土几乎没有发挥其应有的承载力,导致基桩因过早的应力集中作用而发生损坏,最终使得高压旋喷桩复合地基的承载能力大幅降低。基于此,高压旋喷桩复合地基通常会通过垫层来调节基桩和桩间土二者所受的荷载。

1.2 桩土应力比

桩土应力比指刚度较大的基桩桩体和刚度较小的桩间土在承载上部结构传递的荷载时,基桩桩体受到的竖向应力与桩间土受到的竖向应力的比值。高压旋喷桩复合地基的桩土应力比受上部结构荷载作用力大小、基桩桩体与桩间土的模量比及基桩和桩间土面积置换率等因素影响。1) 建筑结构上部荷载大小。基桩桩体和桩间土产生应力变化的最直接因素是上部荷载的作用,上部建筑结构荷载大小直接影响基桩和桩间土应力比的大小。通过高压旋喷桩复合地基桩土荷载的传递性质可知,随着上部荷载作用力逐渐增大,基桩与桩间土的桩土应力比值也逐渐增大,当基桩与桩间土的变形趋于一致,基桩和桩间土应力比会趋于一个固定值。2) 基桩桩体与桩间土的模量比。基桩桩体与

桩间土的模量比越大,基桩桩体受到的应力越集中,基桩与桩间土的应力比也越大。3)基桩与桩间土二者之间的面积置换率。其对桩土应力比有一定的影响,但影响不大,当面积置换率增大,桩土应力比降低,二者呈反比例关系。4)垫层的质量对基桩与桩间土之间的应力分布有较大影响,垫层厚度大、质量好,对基桩和桩间土应力调节能力就越强,从而使得基桩和桩间土之间的应力比降低。5)基桩与桩间土之间的应力与桩长长度呈正比例关系,桩长越长,桩土应力比越大,当桩长增加到一定长度后,桩土应力比达到极限长度不再增大,而是趋于一个定值^[1]。

针对基桩与桩间土应力比的计算,国内外大多根据具体地基处理项目或限定了诸多条件的地基处理形式来提出桩土应力比计算公式。但是,通过前文桩土应力比影响因素可知,复合地基处理应力变化较为复杂,设定了特定条件的桩土应力比计算公式只是在某种假设的前提下适用,并不适用于其他类型的地基处理模式,这导致到目前为止还没有一个较精准的桩土应力比计算公式。现阶段桩土应力比计算公式较常用的是模量比公式,模量比计算公式假定基桩竖向应变和桩间土竖向应变相等,见式(1)。

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} = \frac{E_p \varepsilon_p}{E_s \varepsilon_s} = \frac{E_p}{E_s}; (\varepsilon_p = \varepsilon_s) \quad (1)$$

式中:

n —桩土应力比; σ_p —基桩向上的竖向应力; σ_s —桩间土向上的竖向应力; E_p —基桩的变形模量; E_s —桩间土的变形模量; ε_p —基桩的竖向应变; ε_s —桩间土的竖向应变。

但是,实际施工过程中,桩间土的竖向应变与基桩的竖向应变并非正好相等,有时二者的差值还会较大。基于此,式(1)中桩土应力比的计算结果略显粗糙。经专家对桩土压缩试验数据的分析后得出,桩土应力比可从模量比公式演变成基桩材料和桩间土体积压缩系数比,可将桩土应力比近似成基桩材料和桩间土体积压缩系数之比,见式(2)。

$$n = \frac{m_p}{m_s} \quad (2)$$

式中:

n —桩土应力比; m_p —基桩材料压缩系数; m_s —桩间土压缩系数。

2 高压旋喷桩复合地基工程实例分析

2.1 工程案例背景

某拟建住宅项目工程包括多层住宅、商铺等建筑,本文以多层住宅6号楼为例进行分析。拟建场地北侧为场区拆迁硬化路面,其余场地为荒废耕地,无大型建筑设施,勘探过程中未发现对工程不利的地下埋藏物,地形较平坦,高差不大,但是,建设区域内大部分为软土侵水地基,需进行有效加固。根据同类型建设项目地基处理特点和项目实际情况,项目地基加固采用高压旋喷桩复合地基处理技术。根据地质勘察报告中各地基土层的工程特性及物理力学性质指标,综合确定地基土承载力特征值等基础设计参数如表1所示。

表1 设计参数汇总表

Tab.1 Summary of design parameters

地层编号	地层名称	承载力特征值 f_{ak} (kPa)	重度 γ (kN/m ³)	压缩模量 建议值 E_{s1-2} (MPa)	抗剪强度	
					C (kPa)	φ (°)
②	粉质黏土为主的填筑土	110	19.6	7.0	27	21.3
③	硬塑状粘土	130	19.6	7.1	22	21.6
④	硬塑状粘土	130	19.4	6.6	25	20.3
⑤	软塑状粉质黏土	180	19*	22*	0*	28*
⑥	淤泥质粉质黏土	250	20*	25*	0*	32*
⑦	粉土	170	19.8	7.7	26	22.6
⑧	粉质黏土	180	20.1	8.4	28	23.5
⑨	粉质黏土	280	20*	25*		
⑩	粉质黏土	240	19.9	8.0		

注:带*的为经验值;地基变形计算时,土层压缩模量可按平均压缩曲线选取,砂层压缩模量可直接使用。

项目最终确定高压旋喷桩复合地基的基桩材料为矿渣硅酸盐水泥P.O32.5,旋喷材料水灰比为1.0,高压旋喷桩有效桩长为16m,桩直径为0.6m,桩间距为1.2m,且布桩形式为三角形布置,面积置换率为16.8%,6号楼施工桩数为419根。

2.2 施工现场检测试验

1) 钻芯取样。采用全液压钻进ZR型钻芯取样机,可连续取芯且保证下钻和提钻过程匀速进行。旋喷桩钻芯取样位置设置在桩直径的四分之一处,取芯后的样品直径不小于0.1m,取芯孔的垂直度误差控制在1%以内,全部旋喷桩的取芯率不低于80%。对旋喷桩所取岩芯样品进行外观观察、旋喷均匀程度及水泥含量等简单测试后,用透明胶袋封存送往实验室进一步检验分析。现场取样如图1所示。



图1 现场钻芯取样

Fig.1 Field core drilling sampling

从取芯样品检测数据可知,旋喷桩上部喷灰较均匀,喷量较大,非常坚硬;旋喷桩中部区域喷灰量正常水平,均匀,同样坚硬;旋喷桩下部喷灰较均匀,喷量处于正常到相对较少区间段,坚硬;且所有钻芯取样的旋喷桩桩长均达到16m有效桩长。对所取芯样做无侧限抗压强度测试,其抗压强度均大于设计规范要求要求的1.6MPa。从数据可知,旋喷桩的

无侧限抗压强度从桩顶到桩底呈下降趋势,越靠近桩顶的区域,芯样硬度越高,完整性越好,且固结度越高,越靠近桩底部分,芯样的硬度、完整性及固结度相对降低。

2) 低应变检测。低应变检测是通过波动理论来判断桩身的完整性。案例项目所有桩基全部进行低应变检测,结果汇总见表2。

表2 6号楼桩基低应变检测结果汇总

Tab.2 Summary of low strain test results of pile foundation of Building 6

桩基类型	桩数	占比	结果
I类桩	408	97.4%	合格
II类桩	11	12.6%	合格
III类桩	0	0	——

2.3 桩土应力比分析

研究高压旋喷桩复合地基受力时,必须考虑桩土应力比的变化情况。利用数值模拟软件得到高压旋喷桩复合地基的基桩桩顶竖向应力变化曲线、桩间土竖向应力变化曲线以及基桩和桩间土应力比变化曲线,分别如图2~图4所示。

从图2和图3可知,基桩桩顶竖向应力随上部荷载增加而不断变大,桩间土竖向应力随上部荷载的增加而不断变大,当上部荷载增加到300kPa时,基桩桩顶的竖向应力和桩间土的竖向应力均达到最大值。从图2可知,当上部荷载为0时,桩间土的应力并不是0,主要是为了更准确判断桩间土竖向应力的变化情况,在施加上部荷载前,进行了地应力平衡环节,使桩间土获得了初始地应力。从图4可知,随着上部荷载的增加,基桩桩体与桩间土的应力比逐渐增大,特别是在荷载从30kPa增加到120kPa时,桩土应力比的增速最快,荷载超过120kPa后,桩土应力比增速放缓,当荷载从240kPa时增加到300kPa时,桩土应力的增速趋于平稳。这是因为桩间土的压缩量在荷载作用的初期远大于基桩桩身的压缩量,桩间土被上部荷载压缩下沉,大部分荷载均集中在基桩桩顶,使得基桩桩顶荷载瞬间增大,从而桩土应力比迅速增加,当荷载逐步增加,基桩桩体承受较大荷载后也开始压缩下沉,这时桩间土所承担的荷载也逐渐增加,使得桩土应力比的增速放缓,当上部荷载进一步增加后,基桩桩体的变形和桩间土的变形趋于一致,使得桩土应力比的增速趋于零,逐渐稳定。

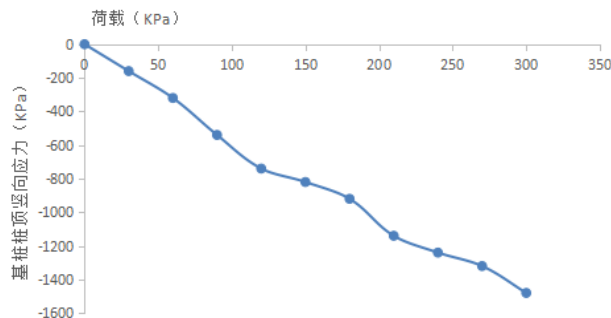


图2 基桩桩顶竖向应力曲线图

Fig.2 Vertical stress curve of foundation pile top

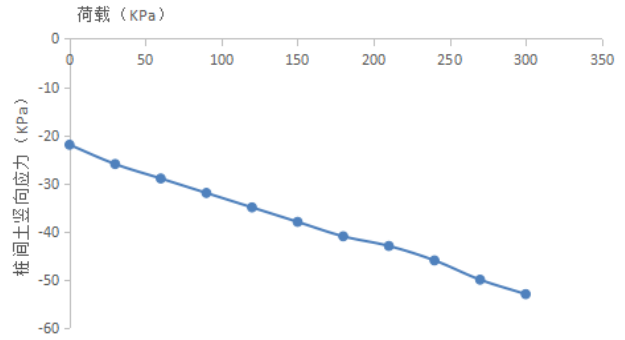


图3 桩间土竖向应力曲线图

Fig.3 Vertical stress curve of soil between piles

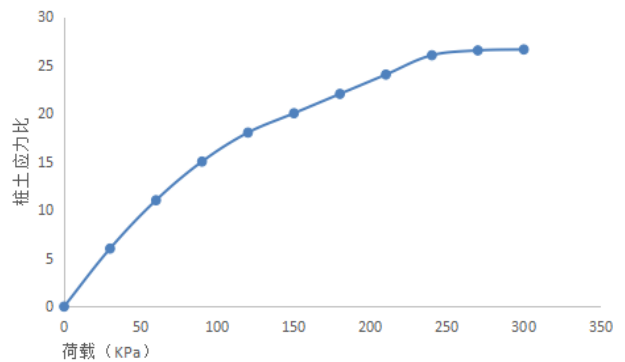


图4 桩土应力比曲线

Fig.4 Pile soil stress ratio curve

3 结语

通过试验研究,得出结论如下: 1) 基桩桩顶竖向应力和桩间土竖向应力随上部荷载的增加而不断变大,当上部荷载增加到300kPa时,两者均达到最大值。2) 随着上部荷载的增加,基桩桩体与桩间土的应力比逐渐增大,荷载小于120kPa时,桩土应力比增速最快,之后增速放缓,荷载大于240kPa时,增速趋于平稳。

参考文献

[1]汪志勇.考虑桩土耦合作用的挤密桩地基的变形及稳定性研究[J].中国建材科技,2016,25(05):21-22.