

文章编号:1673-9469(2008)03-0008-04

粉体喷射桩加固公路软土路基分析

安新正^{1,2}, 易成², 李秋英¹, 王向东¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:粉体喷射桩是加固处理淤泥、淤泥质土、粘土、粉土等软土公路路基、桥头常用的地基处理方法。针对邯郸地区公路路基、桥头中粉体喷射桩复合地基的承载与变形特性,分析了粉体喷射桩-土复合地基中的桩-土应力分担比及复合地基承载力的计算方法、主要影响因素和取值方法,为粉喷桩复合地基在本地区公路路基、桥头工程中的科学应用提供有益的参考。

关键词:粉喷桩;静载荷试验;复合地基;承载力;路堤

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Analysis on the problem for the strengthening soft soil highway's roadbed by dry jet mixing pile

AN Xin-zheng^{1,2}, YI Cheng², LI Qiu-ying¹, WANG Xiang-dong¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Dry jet mixing pile (DJM pile) is a method of the soft soil foundation treatment in strengthening treatment of soft soil Highway's roadbed, such as silt, mud silt, clay, silty soil, and so on. Those calculation methods of the pile-soil stress ratio and the bearing capacity of composite foundation were analyzed by according to the characteristic of bearing capacity and settlement for DJM pile composite foundation on Highway's Roadbed and bridge head embankment of highway. The results are significant for taking account of the effects of pile and soil in the design of the DJM pile composite foundation of highway's roadbed and bridge head embankment of highway.

Key words: dry jet mixing pile (DJM pile); loading test; composite foundation; bearing capacity; embankment

粉体喷射桩(简称粉喷桩)加固处理淤泥、淤泥质土、粘土、粉土等软弱地层,尤其是在加固公路路基、高路堤和桥头接坡等软土地基的应用中技术逐渐成熟。以水泥作为固化剂,掺合一定比例的高性能粉煤灰材料,通过专用的施工搅拌机械将水泥、高性能粉煤灰材料与原位软土进行强制搅拌,使其充分混合并与周围水分经过一系列物理化学作用,形成一种具有较高抗压强度和抗剪强度的水泥土。由于在淤泥、淤泥质土、粘土、粉土等软弱地层中粉喷桩桩体作用,使得桩与土组成的复合地基的竖向承载能力和水平抗力都大大增强,从而提高了路基的承载性能与抗变

形能力。实践已经证明,经粉喷桩加固处理后的公路软土地基,其竖向变形可在较短时间内完成,工后变形一般都很小,不会影响车辆运行^[1]。本文以邯郸地区现场试验资料为基础,对加固后的复合地基的性能及检测和计算方法进行了分析与探讨。

1 粉喷桩与土复合后的承载与变形特性

以桩的施工方法来划分时,粉喷桩的施工可分为干法和湿法。由于干法施工粉体搅拌桩施工质量易于控制和保证,所以目前在公路路基、桥头

收稿日期:2008-05-12

作者简介:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,高级实验师,从事结构工程检测,加固与理论研究。

等软土地基工程中应用较为多见。因此,在此仅仅探讨干法施工的粉体搅拌桩与桩间土的相互作用与变形特征。

邯郸地区多处公路软土路基工程的粉喷桩与土组成的复合地基的多桩-土应力比现场检测试验结果表明,粉喷桩-土之间的应力比直接反映了粉喷桩-土之间的复合承载与变形特性。桩体自身承担的应力与桩间土体承担的平均应力之比,是计算粉喷桩-土复合承载力的一个较为重要的指标。由静载荷试验结果表明,当粉喷桩相对较短(桩的长径比 $L/D < 13$)时,其端承条件对桩-土复合地基中桩与土应力分担和变形特性会有较大的影响。同时,影响桩-土应力分配与荷载传递规律的重要因素还有作用在复合地基上的荷载水平^[2]。试验结果表明,在公路软土路基粉喷桩工程中,桩-土的应力分担比有具如下特征:

(1)当作用的荷载较小时,表现为明显的应力向桩体集中的现象,此时桩体承担的应力较大,粉喷桩桩体起主要作用。

(2)随着作用在多桩复合地基上的荷载值的逐渐增大,粉喷桩与其周围的桩间土共同承载作用关系也在逐渐增强,直至两者均达到承载力极限状态。

依据文献[3-5]的研究并结合大量的邯郸公路路基、桥头等软土地基工程的粉喷桩-土复合地基的桩-土应力比现场及室内试验的实际情况,认为当桩端土为软土时,按(1)式计算比较切合路堤荷载下工程的实际情况。

$$n = \sqrt{E_p/E_s} (\ln m)^{-\alpha} \quad (1)$$

式中 n - 粉喷桩-土的应力比; E_p - 粉喷桩的压缩模量(MPa); E_s - 粉喷桩周围土体的压缩模量(MPa); m - 复合地基置换率; α - 综合经验参数,与桩间土质、荷载水平有关, $\alpha = 1.53 \sim 3.05$ 。

当粉喷桩较短(桩长 $L/D < 13$),且桩端土为硬土时,应对(1)式进行修正,即按(2)式计算比较切合路堤荷载下工程的实际情况。

$$n = \sqrt{kE_p/E_s} (\ln m)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中 k - 桩长与桩端土综合影响系数,其取值范围为 $1.08 \sim 2.36$ (当 $L/D \leq 5$ 时, k 取较大值; $5 < L/D < 13$ 时, k 取较小值); α - 综合经验参数,与桩间土质、荷载水平有关,在此 α 取值范围在 $1.13 \sim 2.12$ 之间。

大量的调查统计发现, n 的计算值在相同的应力水平下,不同土质地区的实测值有较大差别,

其值和桩间土及桩端土的土质存在一定的关系。图1给出了邯郸地区半刚性路堤下,两种情况的粉喷桩-土复合地基中桩土应力比与加载水平之间的典型关系曲线。其中,SS-SC曲线为桩间土为软土,而桩端土为硬土情况;SC-SS曲线为桩间土为硬土,而桩端土为软土情况。

试验资料统计表明,在邯郸地区半刚性路堤条件下, n 的变化范围在 $3 \sim 10.5$ 之间,在取值时除要考虑荷载水平外,还应考虑桩间土的性状和桩端土的影响。

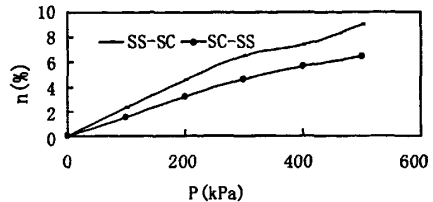


图1 n - p 关系曲线

Fig.1 The curve of n - p

2 粉喷桩复合地基承载力

由于粉喷桩复合地基的承载力受到褥垫层、桩土应力比、桩的刚度等因素的影响,因此该问题目前仍是国内学术界研究的热点之一。

在我国通过静载荷试验方法来获得复合地基的承载力仍为主流方法,但针对静载荷试验中采用多少根桩进行复合试验,目前还没有一致的意见。在邯郸地区的粉喷桩复合地基静载荷试验实践中,进行过单桩复合、两桩复合和四桩复合的静载荷试验,单桩复合以及多桩复合静载荷试验结果表明,多桩复合静载荷试验基本上能够模拟建筑物地基的实际承载条件,比较准确地反映地基的受力状况和变形特征,据此获得的承载力比较切合工程实际。

由于在静载荷试验法的应用中,对规范^[6]有关条款掌握尺度的不尽一致,往往会出现同一地区,不同检测单位,其对承载力的评定结果出入很大。因此,探讨适应于本地区的由静载荷试验资料推定复合地基的承载力是很有必要的。

目前,推定粉喷桩-土复合地基竖向承载力的方法主要有:(1)依据粉喷桩-土复合地基中粉喷桩与桩间土的受力原理,通过静载荷试验方法分别确定单桩及桩间土承载力,再由经验公式确定;(2)由平板静载荷试验资料直接确定。

2.1 公式计算法

将粉喷桩单桩和桩间土分别做静载荷试验,求出单桩承载力和桩间土承载力,然后按规范^[6]中给出的公式计算出复合地基承载力。但实际上由于桩体设计较密,较难通过静载荷试验来获得桩间土的准确值,此时,桩间土的承载力标准值可经勘察来补充获得。

$$R_p = m \frac{R_p}{A_p} + \lambda(1-m)R_s \quad (3)$$

式中 R_p 、 R_s - 复合地基、桩间土承载力标准值(kPa); R_p - 粉喷桩单桩承载力标准值(kN); A_p - 粉喷桩单桩横截面积(m^2); λ - 桩间土承载力折减系数; m - 粉喷桩的面积置换率(%)。

邯郸地区的公路路基粉喷桩工程中,桩间土承载力折减系数的取值要依据桩端的土质情况并结合当地复合地基静载荷试验的实际情况来定,可分为:(1)桩端土为软弱土层时,可取 $\lambda = 0.56$; (2)桩端土为硬土层,可取 $\lambda = 0.25$ 。

单桩竖向承载力标准值要依据单桩载荷试验资料,结合地区差别来合理确定。从粉喷桩载荷试验曲线来看,其荷载-变形曲线一般为缓变形曲线,确定承载力时可采用相对沉降法,但规范中并没有给出具体的取值标准,因此探讨利用单桩载荷试验资料的沉降量与桩的直径的比值,即 s/d 值与单桩承载力的区域相互关系是非常重要的^[7,8],否则将会产生较大的误差。作者根据邯郸地区多项公路路基粉喷桩工程的载荷试验成果,认为用载荷试验确定承载力时,应在充分考虑桩长、龄期、桩身强度、桩间土的性质等各种影响因素后,根据试验曲线的性质与类型,采用不同的确定方法,荷载-变形曲线为缓变形时,可在 $s/d = 0.004 \sim 0.01$ 范围内取值。

另外,若无粉喷桩单桩的载荷试验资料时,也可以依据规范^[6,9]推荐的单桩竖向承载力标准值计算公式进行取值。计算方法见公式(4)和公式(5),结果取其中较小值。

$$R_p = \eta f_{a,k} A_p \quad (4)$$

$$R_p = q_s U_p L + \alpha_k A_p q_p \quad (5)$$

式中 $f_{a,k}$ - 与粉喷桩桩身加固土配合比相同的室内加固土试块无侧限抗压强度平均值(kPa); η - 强度折减系数; q_s - 桩周土的平均摩擦阻力(kPa); U_p - 桩周长(m); L - 桩长(m); α_k - 桩端天然地基土的承载力折减系数。

规范^[6,9]推荐的 η 和 α_k 的取值范围较大,对计算结果的影响是很大的。针对邯郸地区公路路基粉喷桩及地质资料并与单桩载荷试验结果比较可知 η 宜取 $0.38 \sim 0.40$, α_k 宜取 $0.45 \sim 0.50$ 。

2.2 载荷试验资料法

(1)载荷试验为单桩复合地基。在粉喷桩-土复合地基载荷试验中,由于单桩复合地基载荷试验简单、经济,所以应用得最为广泛。规范^[6]规定了单桩复合地基载荷试验的承压板面积为一根桩承担的处理面积,因此在载荷试验中应尽量采用与一根粉喷桩负担的处理面积相同的承压板。但实际试验中,往往承压板面积与一根粉喷桩负担的处理面积并不同。试验研究表明,试验中采用的承压板面积大于计算值时的效果要远远优于小于计算值时的效果。因此当试验中采用的承压板面积与计算值不同时,必须对测试结果进行修正,从而得到复合地基承载力标准值。修正时可采用(6)式进行计算。

$$R_p = \frac{Q - \lambda(A - A_e)R_s}{A_e} \quad (6)$$

式中 A_e - 单根桩承担的处理面积(m^2); Q - 压板上所承受的荷载值(kN); A - 压板面积(m^2); R_p 、 R_s 、 λ 含义同(3)式。

(2)载荷试验为多桩复合地基。多桩复合地基载荷试验通常采用二桩或四桩复合承载试验,压板面积与实际桩数所承担的处理面积应尽可能地相等,当不相等时也可参照(6)式进行计算。在粉喷桩-土复合地基载荷试验中,由于多桩复合地基载荷试验费用较高,所以在现场的静载荷试验中采用较少,但多桩复合地基载荷试验与单桩复合地基载荷试验相比,其试验数据更能反映复合地的实际性质,由此获得的粉喷桩-土复合地基的承载力与变形性能才比较准确。

半刚性路基下粉喷桩-土复合地基的变形是由等沉面以上加固段、等沉面以下加固段以及下卧层的压缩量叠加而成,在长期的柔性荷载作用下,下卧层的压缩沉降是主要的。就现场静载荷试验来说,如果承压板面积相对较小,其成果就不能确切地反映下卧层实际的压缩变形,所以承压板面积的大小也应引起足够的重视。

获得平板静载荷试验获得 $p-s$ 曲线后宜采用以下方法对粉喷桩复合地基的承载力进行评定:

转折点法。当 $p-s$ 曲线有明显的比例极限

点或转折点,可取该点所对应的荷载。

相对沉降法。当 $p-s$ 曲线为缓变形曲线时,取 s/d 为一定值所对应的荷载为复合地基的容许承载力,规范^[6]规定 $s/d=0.004-0.010$ 所对应的荷载,具体取值要依据地区的工程实践经验确定。

极限荷载法。由 $p-s$ 曲线上所得的极限荷载除以安全系数得到。

强度控制法。取沉降量超过前一级荷载下沉降增量的两倍,或取 $\lg p - \lg s$ 、 $s - \lg p$ 等曲线的第一拐点所对应的压力作为承载力基本值。以上方法在确定单桩或多桩复合地基承载力时都有各自的使用前提,在使用时要依据实际的 $p-s$ 曲线特性,参考地区的实际情况来选择合适的取值方法。

3 结束语

半刚性路基下的粉喷桩复合地基,其承载性能及变形特性有着很强的区域特征,在设计中应综合考虑各种因素的作用:

1) 粉喷桩-土应力比受许多因素的影响,给出了其在不同条件下的计算方法及取值范围;

2) 静载荷试验中,承载板的大小对最终结果影响较大,应引起足够的重视。同时提出了利用 $p-s$ 曲线来确定软土公路路基中复合地基承载力的实用方法。

3) 目前多桩复合地基的静载试验研究开展的

较少,为了更好地掌握粉喷桩处理后的复合地基的基本性能,使其在设计上既经济又科学,在今后的工作中应着重开展两个方面的研究:一是开展多桩复合地基的静载试验研究,探讨切合实际的复合地基静载荷试验方法;二是探讨减少人为因素影响,且具有一定工程应用价值的粉喷桩复合地基承载力取值方法。

参考文献:

- [1] 李世秋,胡新民. 水泥粉喷桩在道路软基处理中的应用[J]. 混凝土,2004,181(11):72-73.
- [2] 吴雄志,贾志刚,涂兵雄. 水泥土桩荷载传递性状的数量分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(1):4-7.
- [3] 宋修广. 水泥搅拌桩桩土应力比研究[J]. 山东大学学报(工学版),2003,33(4):467-469.
- [4] 李海芳,温晓贵,龚晓南. 低强度桩复合地基处理桥头跳车现场试验研究[J]. 中南公路工程,2003,28(3):27-30.
- [5] 马时东. 水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J]. 土木工程学报,2002,35(2):48-51.
- [6] JGJ79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [7] 杜海金,史三元. 载荷试验确定粉喷桩承载力的标准探讨[J]. 工程勘察,2001,(1):17-19.
- [8] 黄辉. 确定粉喷桩承载力中几个问题探讨[J]. 煤炭工程,2002,(11):48-49.
- [9] TB10113-96, 粉体喷搅法加固软弱土层技术规范[S].

(责任编辑 闫纯有)

粉体喷射桩加固公路软土路基分析

作者: [安新正](#), [易成](#), [李秋英](#), [王向东](#), [AN Xin-zheng](#), [YI Cheng](#), [LI Qiu-ying](#), [WANG Xiang-dong](#)

作者单位: [安新正, AN Xin-zheng \(河北工程大学, 土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038; 中国矿业大学, 力学与建筑工程学院, 北京, 100083\)](#), [易成, YI Cheng \(中国矿业大学, 力学与建筑工程学院, 北京, 100083\)](#), [李秋英, 王向东, LI Qiu-ying, WANG Xiang-dong \(河北工程大学, 土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#)

刊名: [河北工程大学学报 \(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 25 (3)

参考文献(9条)

1. [李世秋; 胡新民](#) 水泥粉喷桩在道路软基处理中的应用[期刊论文]-[混凝土](#) 2004(11)
2. [吴雄志; 贾志刚; 涂兵雄](#) 水泥土桩荷载传递性状的数值分析[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007(01)
3. [宋修广](#) 水泥搅拌桩桩土应力比研究[期刊论文]-[山东大学学报\(工学版\)](#) 2003(04)
4. [李海芳; 温晓贵; 龚晓南](#) 低强度桩复合地基处理桥头跳车现场试验研究[期刊论文]-[中南公路工程](#) 2003(03)
5. [马时东](#) 水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[期刊论文]-[土木工程学报](#) 2002(02)
6. [JGJ 79-2002](#). 建筑地基处理技术规范
7. [杜海金; 史三元](#) 载荷试验确定粉喷桩承载力的标准探讨[期刊论文]-[工程勘察](#) 2001(01)
8. [黄辉](#) 确定粉喷桩承载力中几个问题探讨[期刊论文]-[煤炭工程](#) 2002(11)
9. [TB 10113-1996](#). 粉体喷搅法加固软弱土层技术规范

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200803003.aspx