

文章编号:1008-1542(2012)01-0074-05

旋喷桩复合地基承载力的确定

宋兴海¹, 刘振京¹, 张云¹, 路维¹, 孙莲阁²

(1. 河北工程技术高等专科学校土木工程系, 河北沧州 061001; 2. 沧州医学高等专科学校招生办, 河北沧州 061001)

摘要:介绍了旋喷桩复合地基承载力确定的方法。结合深圳地区某旋喷桩复合地基现场静载试验对复合地基承载力的确定做了探讨, 认为利用公式估算复合地基承载力特征值时要合理选择 R_a, f_{sk}, β 的取值。对静载试验值极差大于平均值 30% 的复合地基如何确定承载力特征值进行探讨, 引进了较为合理的取值方法。提出了将大小不一的压板下载荷试验得到的复合地基承载力换算成实际基础面积下的复合地基承载力的换算方法。

关键词:旋喷桩; 复合地基; 承载力

中图分类号: TU473 文献标志码: A

Determination of bearing capacity of rotary jet grouting piled composite foundation

SONG Xing-hai¹, LIU Zhen-jing¹, ZHANG Yun¹, LU Wei¹, SUN Lian-ge²

(1. Department of Civil Engineering, Hebei Engineering and Technical College, Cangzhou Hebei 061001, China; 2. Admissions Office, Cangzhou Medical College, Cangzhou Hebei 061001, China)

Abstract: This paper introduces a method of determining the bearing capacity of rotary jet grouting piled composite foundation, and in combination with the on-site experiment of rotary jet grouting piled composite foundation in Shenzhen area, makes the analysis on the bearing capacity of the composite foundation. It is confirmed that while utilizing the formula to estimate the characteristic value of capacity, the values of R_a, f_{sk} and β should be properly chosen. The determination of the characteristic value of capacity is studied when the range is 30% greater than that of the average in the static load test. Accordingly, a method is put forward to convert the bearing capacity of composite foundation by different pressure plate area load tests to the actual bearing capacity of composite foundation.

Key words: composite foundation; rotary jet grouting pile; bearing capacity

复合地基是指天然条件下地基和杂填土在处理过程中部分地基土体得到增强, 由增强体和其周围地基土共同承担上部荷载并协调变形的人工地基^[1]。旋喷桩地基就是由旋喷桩、桩间土与褥垫层共同组成的复合地基。旋喷桩最早于 20 世纪 60 年代末期应用于日本大阪市地下铁路的施工中, 中国是继日本之后研究开发高压喷射注浆法较早、应用范围较广的国家。高压喷射注浆法具有施工设备简单、轻便、噪声和振动小、施工速度快、机械化程度高、成本低、用途广等优点, 在国内外应用比较广泛。

旋喷桩复合地基承载力特征值应该由现场载荷试验来确定。设计时可由公式法来初步估算, 复合地基施工结束并达到一定强度后, 由检测单位进行静载荷试验, 检验地基承载力。

收稿日期: 2011-08-29; 责任编辑: 冯 民

作者简介: 宋兴海(1982-), 男, 河北南皮人, 讲师, 主要从事土力学与地基基础方面的教学与研究。

1 理论计算

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)^[2]规定旋喷桩复合地基承载力特征值应由载荷试验来确定,设计时可按式(1)初步估算:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值(kPa); m 为复合地面积置换率; R_a 为单桩竖向承载力特征值(kN); A_p 为旋喷桩的横截面积(m^2); β 为桩间土的承载力折减系数,可由试验或工程经验确定,当没有试验数据或经验时,可取 0~0.5,承载力较低时取较低数值; f_{sk} 为处理后的桩间土的承载力特征值(kPa),应按当地情况取值,若没有经验,可取天然地基的承载力特征值。

单桩竖向承载力特征值可通过现场单桩载荷试验确定。也可按式(2)和式(3)估算,取其中较小值:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p, \quad (2)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p \quad (3)$$

式中: f_{cu} 为与旋喷桩桩身水泥石配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7 mm 的立方体)在标准养护条件下 28 d 龄期的立方体抗压强度平均值(kPa); η 为桩身强度折减系数,可取 0.33; l_i 为桩周第 i 层土的厚度(m); q_{si} 为桩周第 i 层土的侧面阻力特征值(kPa),可由《建筑地基基础设计规范》(GB 5007—2002)相关规定或地区经验来确定; q_p 为桩端地基土未经修正的承载力特征值(kPa),可由《建筑地基基础设计规范》(GB 5007—2002)相关规定或地区经验来确定。

在没有试验数据的情况时,可按式(1)初步估算复合地基承载力,但也应结合当地工程经验,来合理地确定 R_a , f_{sk} , β 。考虑到对工程保持有足够安全度,公式计算结果不宜大于载荷试验结果^[3]。

2 现场试验

复合地基承载力的理论值一般偏于安全,在复合地基的初步设计时,就安全角度来考虑,可由式(1)来初步计算复合地基承载力。但是同一复合地基的 R_a , f_{sk} , β 等的取值难以确定,这样往往会得出不同的复合地基承载力理论值。故《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)强调复合地基在竣工后验收时,必须应用载荷试验来检测承载力,对于旋喷桩还强调应用复合地基载荷试验以及单桩载荷试验来检测承载力。

当前,静载荷试验是最具权威的载荷试验方法,它能很好地模拟实际桩身载荷工况,得到桩的实际条件下的承载力值。载荷试验一般在 28 d 龄期后进行,通过 p - s 曲线确定复合地基承载力。

2.1 承载力特征值试验值的确定

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)规定:

1) 当压力-沉降曲线上的极限荷载能确定,且其值不小于对应比例界限的 2 倍时,可以取比例界限;当其值小于对应比例极限的 2 倍时,可取极限荷载的 1/2;

2) 当压力-沉降曲线是平缓的光滑曲线时,可按相对变形值确定,且不应大于最大加载压力的 1/2,对于旋喷桩复合地基,可以取 s/b 或 s/d 等于 0.006 所对应的压力。

2.2 承载力特征值试验值的统计计算

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002),对于复合地基,当需要进行静载试验时,试验点的数量不应少于 3 点,当满足其极差不超过平均值的 30% 时,可以取其平均值为复合地基承载力特征值,然而对于极差大于平均值 30% 的复合地基,如何确定其承载力特征值,规范未作进一步明确规定。笔者建议按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[4]第 14.2.4 条确定岩土参数标准值的统计方法,对极差大于平均值 30% 的复合地基承载力试验值进行统计计算,即

$$f_{spk} = \gamma_s f_{spk}^m, \quad (4)$$

$$\gamma_s = 1 - \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta. \quad (5)$$

式中： f_{spk} 为复合地基承载力特征值(kPa)； f_{spk}^m 为复合地基承载力实测平均值(kPa)； γ_s 为统计修正系数； δ 为复合地基承载力变异系数； n 为桩长范围内所划分的土层数。

2.3 不同压板面积荷载试验确定的承载力与实际基础作用下承载力之间的换算

进行复合地基荷载试验时,使用的压板面积大小不一,则压板面积范围内的桩土置换率就不同,最终得到的承载力值就不同。如果压板面积作用下的桩土置换率与实际基础相同,则由荷载试验确定的复合地基承载力就等于实际的复合地基承载力。如果压板面积作用下的桩土置换率与实际基础不同,则由荷载试验确定的复合地基承载力就不等于实际的复合地基承载力。此时建议通过式(6) — 式(8) 将不同压板面积作用下的复合地基承载力换算成实际基础面积作用下的复合地基承载力。

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1 - m)f_{sk}, \tag{6}$$

$$f'_{spk} = m'R'_a/A_p + \beta(1 - m')f'_{sk}。 \tag{7}$$

式(6) 为荷载试验条件下承载力的计算,式(7) 为实际基础作用下承载力的计算,式中各参数含义同式(1) 中各参数。

复合地基中桩的强度往往能得到充分发挥,桩间土则不然,式中用折减系数来反应。则实际基础作用下和荷载试验条件下桩的承载力特征值和桩周地基土承载力特征值都是相同的,即 $R_a = R'_a, f_{sk} = f'_{sk}$, 故联立式(6) 和式(7) 得

$$f'_{spk} = \frac{m'}{m}f_{spk} + \beta\left(1 - \frac{m'}{m}\right)f_{sk}。 \tag{8}$$

3 工程实例

笔者以广深港铁路客运专线 ZH-2 标(里程 DK43 + 860—DK44 + 047) 旋喷桩复合地基为例,对其地基承载力的确定进行讨论。

该里程线路为平原区,河流纵横,地形平坦,多为农田及水塘,场地土层条件见表 1。旋喷桩桩径 $d = 0.5\text{ m}$,按等边三角形布置,桩距 $s = 1.4\text{ m}$,桩长 $14.6 \sim 17.6\text{ m}$,水泥掺量 150 kg/m ,水灰比 $1 : 1$,喷浆压力 23 MPa 。对 5-17[#], 13-17[#], 34-2[#], 46-2[#] 4 个实验点进行复合地基荷载试验,载面板尺寸为 $1.41\text{ m} \times 1.41\text{ m}$, $p-s$ 曲线见图 1,设计复合地基承载力特征值为 150 kPa ；对 9-14[#], 40-4[#], 46-8[#] 3 个实验点进行单桩竖向抗压荷载试验, $p-s$ 曲线见图 2,设计单桩抗压承载力特征值为 130 kN 。

表 1 场地土层条件

Tab. 1 Stratum conditions

层序	岩土层描述	承载力特征值 /kPa
1.素填土	松散,层厚:0.8 ~ 1.5 m	—
2.淤泥	流塑状,层厚:3.9 ~ 6.5 m	45
3.黏土	软塑状,层厚:1.9 ~ 5.0 m	110
4.淤泥质黏土	软塑状,层厚:1.6 ~ 5.3 m	45
5.局部黏土	软塑状,层厚:0 ~ 3.7 m	110
6.粉质黏土	硬塑状,层厚:0 ~ 1.9 m	220
7.含砾砂岩	全风化	220

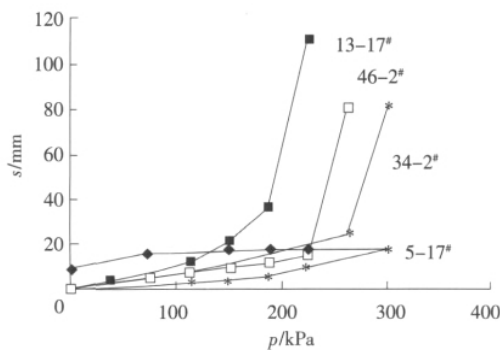


图 1 单桩复合地基各荷载试验 $p-s$ 曲线
Fig. 1 $p-s$ curve of each single pile composite foundation load test

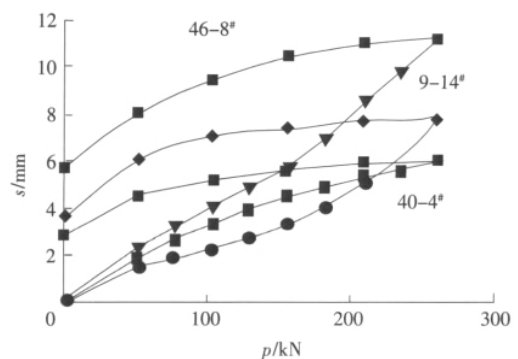


图 2 单桩抗压各荷载试验 $p-s$ 曲线
Fig. 2 $p-s$ curve of each single pile pressed load test

3.1 承载力的理论估算

从图 2 可以看出, 9-14[#], 40-4[#], 46-8[#] 单桩竖向抗压承载力极限值均不小于 260 kN, 单桩竖向抗压承载力特征值均不小于 130 kN, 满足设计要求。由《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)^[5] 第 4.4 节知单桩竖向抗压承载力特征值为 $R_a = 130$ kN。故复合地基承载力估算值为 $f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk} = 92.75$ kPa。

3.2 承载力的现场试验确定

由图 1 可知 5-17[#] 复合地基的极限承载力不小于 300 kPa, 承载力特征值不小于 150 kPa, 满足设计要求。13-17[#], 34-2[#] 和 46-2[#] 没有按预定最大试验加载量完成试验, $p-s$ 曲线提前出现明显拐点, 承载力均不满足设计要求。根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002) 第 A.0.9 条确定各试验点承载力特征值见表 2, 显然极差大于平均值的 30%。

表 2 复合地基载荷试验结果

Tab. 2 Load test results of composite foundation				
编号	5-17 [#]	13-17 [#]	34-2 [#]	46-2 [#]
特征值 /kPa	150	94	132	113

根据复合地基载荷试验结果计算复合地基承载力试验结果平均值为

$$f_{spk}^m = \frac{\sum_{i=1}^n f_{spk,i}}{n} = 122 \text{ kPa}。$$

标准差为

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n f_{spk,i}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n f_{spk,i} \right)^2}{n} \right]} = 24 \text{ kPa}。$$

变异系数为 $\delta = \frac{\sigma_f}{f_{spk}^m} = 0.2$ 。

统计修正系数为

$$\gamma_s = 1 - \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta = 0.77。$$

复合地基承载力试验结果统计值为

$$f_{spk} = \gamma_s f_{spk}^m = 94 \text{ kPa}。$$

载荷试验条件下桩土置换率为

$$m = \frac{A_p}{1.41 \times 1.41} = 0.098。$$

而实际桩土置换率为 $m' = \frac{d^2}{(1.05s)^2} = 0.116$, 故由载荷试验得到的复合地基承载力特征值为

$$f'_{spk} = \frac{m'}{m} f_{spk} + \beta \left(1 - \frac{m'}{m} \right) f_{sk} = 107.68 \text{ kPa}。$$

3.3 结果分析

从计算结果可以看出, 承载力理论值小于现场载荷试验值, 主要是因为以下 2 点。

1) R_a 的取值偏小

由于本实例只是对按照设计要求施工的工程桩构成的复合地基的承载力是否能达到设计要求进行检验, 所以, 试验的最大加载量可只加到设计载荷的 2 倍^[6]。在加载过程中没有出现极限载荷, 并且相应沉降很小, 因而计算时其值取为最大加载量的 1/2 作为特征值。其实际特征值往往会比此值大。

由于复合地基中桩间土应力在桩侧产生附加应力, 导致桩的侧向阻力增加, 同时在桩端产生的附加应力形成边梢效应, 增加了桩端阻力, 所以, 复合地基中的单桩承载力要比自由条件下的单桩承载力大一些, 用自由条件下的单桩载荷试验结果估算的承载力偏安全一些。

2) f_{sk} 的取值偏小

由于复合地基中桩的存在, 使得桩间土的侧向变形受到很大限制, 从而使桩间土的竖直向变形变小, 承载力相对于天然地基有所提高。

此外,由统计结果可知,按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)第 14.2.4 条确定岩土参数标准值的统计方法得到的复合地基承载力统计值很接近最小试验值。静载检测本身是通过小样本来推断总体,样本容量越小,可靠度越低。本实例样本容量较大,以统计方法得到的复合地基承载力统计值作为该复合地基承载力特征值是比较合适的。

4 结 论

通过以上分析,可以得出如下结论。

1)可按式(1)初步估算复合地基承载力特征值,同时也要考虑当地经验,合理确定 R_a, f_{sk}, β 。

2)通过对深圳某旋喷桩复合地基静载试验结果的统计特征进行分析,提出了在极差大于平均值 30% 的情况下,复合地基承载力特征值的取值可参照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)第 14.2 节(岩土参数的分析和选定)所推荐的方法进行统计计算。

3)用现场载荷试验确定复合地基承载力特征值时,试验与实际工程具有相同的桩土置换率是最理想的。但要做到这一点是很困难的,因此,可先采用标准的压板面积进行载荷试验,再按本文换算公式进行换算,进而得到相对合理的结果。

参考文献:

- [1] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2003.
- [2] JGJ 79—2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 李 琴,张同贵. 粉喷桩复合地基承载力现场试验研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版)(Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)), 2006, 19(1): 76-78.
- [4] GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [5] JGJ 106—2003, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [6] 马克生,梁仁旺,白晓红. 水泥搅拌桩复合地基承载力的试验确定[J]. 岩石力学与工程学报(Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering), 2004, 23(15): 2 652-2 654.

(上接第 60 页)

- [9] 张奇智,张 彬,张卫东. 基于网络演算计算交换式以太网中的最大时延[J]. 控制与决策(Control and Decision), 2005, 20(1): 117-120.
- [10] FALK H. Test methodologies, setup and result documentation for EPRI sponsored benchmark of ethernet for protection control[EB/OL]. <http://ftp.sisconet.com/epri/benchmrk/ethernet.zip>.
- [11] XIN Jian-bo, DUAN Xian-zhong. Study on method for determining the buffer size of communication module inside SMU on emergency [A]. IEEE-PES T&D 2003 Conference & Exhibition[C]. Dalian: [s. n.], 2005.
- [12] 史英英,李智慧,王建南. 具有灰色输入率的 M/M/1 排队系统[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2011, 32(1): 8-10.
- [13] 刘建民. 多类顾客多服务台队列网络的高负荷极限量[J]. 数学的实践与认识(Mathematics in Practice and Theory), 2004, 34(1): 108-112.
- [14] SLEPTEHENKO A, HARTEN A van, HEIJDEN M van. An exact solution for the state probabilities of the Multi-Class, Multi-Server Queue with preemptive priorities[J]. Queueing Systems: Theory and Applications, 2005, 50(1): 81-107.
- [15] TR84. 0.02 Draft Technical Report. Network Based automation[R]. NC: Geneva, 2001.
- [16] PREISS O, WEGMANN A. Towards a composition model problem based on IEC 61850[J]. Journal of Systems and Software, 2003, 65(3): 227-236.