

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.05.014

【一题一议】

# 有粘结强度增强体复合地基的设计 与承载力检验探讨

周载阳

(建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 复合地基尤其是有粘结强度增强体的复合地基, 虽然在工程建设中得到了广泛的应用, 但其理论及工作机理的研究尚不充分, 设计计算仍处于半经验半理论的状态, 还存在很多问题。而作为保证工程质量和安全的复合地基承载力检验也就显得非常重要, 检验的方法应能代表复合地基的实际工作状态, 但实际情况并不如此。本文针对目前我国工程实践和技术规范中的设计计算方法与承载力检验方法进行分析探讨, 并提出了相关建议。

**关键词:** 有粘结强度增强体; 复合地基承载力; 设计; 检验

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0527-04

## Discussion on design and bearing capacity testing of composite foundation with bonded strength reinforcement

ZHOU Zaiyang

(CIGIS (China) Limited, Beijing 100007, China)

**Abstract:** While composite foundations with bonded strength reinforcement are extensively utilized, there exists a notable deficiency in the theoretical understanding and working mechanisms associated with them. The design calculations remain in a semi-empirical state, leaving numerous unresolved questions. Consequently, the testing of the bearing capacity of composite foundations is paramount importance as it ensures the quality and safety of engineering projects. However, the current state of test methods fails to adequately represent the actual working conditions of composite foundations. Through analysis and discussion of design calculation methods and bearing capacity testing for composite foundations with bonded strength reinforcement, as recommended by specifications and utilized in engineering practices, this work presented pertinent suggestions for improvement.

**Key words:** bonded strength reinforcement; bearing capacity of composite foundation; design; test

## 0 引言

复合地基以其在经济性和实用性方面的巨大优势, 在我国的工程建设中得到了广泛的应用, 但其理论及工作机理的研究尚不充分, 设计计算仍处于半经验半理论的状态, 按照现行《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012) [1], 对于有粘结强度增强体的复合地基, 其承载力计算公式为:

$$f_{\text{spk}} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{\text{sk}} \quad (1)$$

式中:  $f_{\text{spk}}$  为复合地基承载力特征值, kPa;  $\lambda$  为单桩承载力发挥系数;  $m$  为面积置换率;  $R_a$  为单桩承载力特征值, 为桩周土的侧摩阻力与桩端端阻力之和, kN;  $A_p$  为桩的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\beta$  为桩间土承载力发挥系数;  $f_{\text{sk}}$  为处理后桩间土承载力特征值, kPa。

此外规范 [1] 规定, 对于非大面积压实填土的处理地基, 基础宽度的地基承载力修正系数为 0, 基础埋深的地基承载力修正系数为 1.0。同时要求复合地基承载力验收检验应采用复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验。

对于经基础埋深修正的复合地基, 其修正后承

收稿日期: 2023-11-20

作者简介: 周载阳 (1966—), 男, 河北南皮人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程研究和工程实践工作。E-mail: zhouzy@cigis.com.cn。

承载力特征值  $f_{spa}$  要大于  $f_{spk}$ ，实际工作状态时复合地基中单桩所承担的荷载可能远大于设计计算的单桩承载力特征值  $R_a$ 。此外，复合地基静载荷试验的检验，以单桩承载力特征值  $R_a$  和基础埋深修正前的复合地基承载力特征值  $f_{spk}$  为检验目标，不能代表复合地基的实际工作状态，有时可能相差甚远。

## 1 复合地基设计现状及存在的问题

目前有粘结强度增强体的复合地基设计，一般是主体结构单位提出未经基础埋深修正的复合地基承载力特征值  $f_{spk}$  和变形控制的要求，地基处理设计时先根据岩土工程条件确定桩端持力层，计算单桩承载力特征值  $R_a$ ，然后根据复合地基承载力特征值  $f_{spk}$  计算面积置换率，从而确定布桩方式及桩间距，最后验算变形是否满足要求。按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) [2] 的要求，需要进行基础埋深修正，修正后主体结构单位最终采用的复合地基承载力特征值为  $f_{spa}$ 。

$$f_{spa} = f_{spk} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) \quad (2)$$

式中： $\eta_b$  为基础宽度的地基承载力修正系数，取 0； $\eta_d$  为基础埋深的地基承载力修正系数，取 1.0； $\gamma$  为基础底面以下土的重度， $\text{kN/m}^3$ ，地下水位以下取浮重度； $b$  为基础宽度，m，当基础底面宽度小于 3 m 时取 3 m，大于 6 m 时取 6 m； $\gamma_m$  为基础底面以上土的加权平均重度， $\text{kN/m}^3$ ，位于地下水位以下的土层取有效重度； $d$  为基础埋深，m，对于基础周边存在纯地下结构等削弱侧向约束作用时，取等效埋深。

如上所述，复合地基设计时，计算的单桩承载力特征值为  $R_a$ ，对应的复合地基承载力特征值为修正前的  $f_{spk}$ ，深度修正后的复合地基承载力特征值为  $f_{spa}$ ，假定修正前后复合地基桩土应力比  $\lambda(R_a/A_p)/\beta f_{sk} = n$  不变，则式 (1) 和式 (2) 可改写为：

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} = m \frac{\lambda R_a}{A_p} + (1-m) \frac{\lambda R_a}{n A_p} = \frac{\lambda R_a}{A_p} \left( m + \frac{1-m}{n} \right) \quad (3)$$

$$f_{spa} = f_{spk} + \gamma_m (d-0.5) = \lambda m \frac{R_a'}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}' = m \frac{\lambda R_a'}{A_p} + (1-m) \frac{\lambda R_a'}{n A_p} = \frac{\lambda R_a'}{A_p} \left( m + \frac{1-m}{n} \right) \quad (4)$$

由式 (4) 与式 (3) 相比得：

$$\frac{f_{spa}}{f_{spk}} = \frac{R_a'}{R_a} = 1 + \frac{\gamma_m (d-0.5)}{f_{spk}} \quad (5)$$

式中： $R_a'$  为经基础埋深修正的复合地基中单桩的承载力特征值，kN。

很显然，经基础埋深修正的复合地基，其承载力特征值  $f_{spa}$  要大于  $f_{spk}$ ， $R_a' > R_a$ ，尤其当基础埋深修正值较大时，其差异非常明显。实际工作状态时复合地基承担的基底压力为  $f_{spa}$ ，其中有粘结强度的增强体即单桩所承担的荷载是  $R_a'$ ，可能远大于设计计算的单桩承载力特征值  $R_a$ 。设计单桩承载力特征值为  $R_a$ ，实际使用的单桩承载力特征值为  $R_a'$ ，设计过程中却没有单桩承载力特征值  $R_a'$  的相关验算，设计过程不闭合，不能自圆其说。

## 2 复合地基承载力检验现状及存在的问题

再来看看复合地基承载力检验，对于复合地基，我们很难通过静载荷试验直接得到复合地基承载力特征值  $f_{spk}$ ，除非是 1:1 足尺寸的载荷试验，这基本上是做不到的。设计文件中对复合地基验收检验的目标要求一般是单桩承载力特征值  $R_a$  及复合地基承载力特征值  $f_{spk}$ 。实际工程中，开挖至增强体顶部标高后进行复合地基承载力检验，多进行单桩和复合地基静载荷试验，安全系数为 2.0。检验合格的标准为单桩承载力特征值不小于  $R_a$ 、复合地基承载力特征值不小于  $f_{spk}$ 。

由于静载荷试验的承载板面积有限，影响的土层深度有限，对于方形承压板，地基土中 0.1 倍试验荷载的等竖向附加应力  $\sigma_z$  线在承压板中心线下约 2 倍宽度处 [3]。一般而言，大多数的复合地基桩间距不大于 2 m，对于单桩复合地基静载荷试验，桩间土中 0.1 倍试验荷载的等竖向附加应力  $\sigma_z$  线大多都在桩顶下 4 m 范围内。对于多桩复合地基静载荷试验，比如 4 桩复合地基静载荷试验，其承压板边长一般在 4 m 以内，其 0.1 倍试验荷载的等竖向附加应力  $\sigma_z$  线大多都在桩顶下 8 m 左右。无论是单桩复合地基静载荷试验还是多桩复合地基静载荷试验，荷载影响范围均在桩顶下一定范围内，大多不会超过桩长。而实际工况下，对于一个 20 m 宽度的方形筏板基础来讲，地基土中 0.1 倍荷载的等竖向附加应力  $\sigma_z$  线在基底下约 40 m 处，鉴于目前复合地基的处理深度一般不超过 30 m，其影响深度远

远超过桩长。另外桩周土的应力水平也影响着桩的侧摩阻力, 桩周土的水平向应力增大会引起桩侧摩阻力的增加。由此可见, 复合地基静载荷试验时只有桩顶附近的桩间地基土参与桩土共同作用, 而在实际基础作用下, 桩长范围内的所有桩间地基土均参与桩土共同作用, 复合地基静载荷试验时的桩土应力状态与实际工况下的应力状态大相径庭, 其试验结果不能反映复合地基的真实工作特征。至于单桩承载力, 目前静载荷试验检验时的工况与按式(1)设计计算的工况一致, 可以看作是复合地基设计和施工中的一个过程工况。

### 3 结论与建议

实际工程中不乏采用经深度修正后的复合地基承载力特征值的案例, 虽然实际工况下增强体承受的荷载  $R_a'$  大于设计计算的单桩承载力特征值  $R_a$ , 但大多都工作正常, 没有出现问题, 这可能有以下几个方面的原因: (1) 单桩承载力特征值的计算理论不完善, 侧摩阻力受桩周土的水平向应力影响较大, 单桩承载力计算公式中未能体现。实际工况下, 复合地基桩土共同作用, 桩间土承受外部荷载, 其应力水平较高, 水平向应力亦较大, 增加了桩的侧摩阻力。(2) 桩的承载能力有安全储备。(3) 桩土共同作用机理复杂, 实际的桩土应力比与计算不一致, 有待进一步研究。(4) 复合地基中存在有粘结强度增强体时, 其破坏机理与天然地基完全不同, 天然地基浅基础极限状态下的理论滑动面是对数螺旋线<sup>[4]</sup>, 受竖向增强体的限制和影响, 复合地基极限状态下的理论滑动面无论位置还是形状必然与天然地基浅基础差异巨大, 承载力的基础埋深修正亦需重新考虑。

对于复合地基设计未验算基础埋深修正后的单桩承载力问题, 在现有规范体系下应完善单桩承载力验算, 按照正常设计程序计算得到复合地基的  $f_{spk}$  和  $f_{spa}$  后, 按式(4)或式(5)计算得到经基础埋深修正后复合地基中的单桩承载力特征值  $R_a'$ , 然后重新验算单桩承载力是否满足  $R_a'$ , 如不满足则可适当调整设计: (1) 增加桩长使计算的单桩承载力特征值不小于  $R_a'$ 。(2) 令目前计算的单桩承载力特征值等于  $R_a'$ , 根据已知的  $f_{spa}$ 、 $f_{spk}$  和  $f_{sk}$ , 由式(3)和式(4)得到置换率  $m$ , 按照置换率  $m$  调整桩间距。其实应该直接按此步骤进行设计。(3) 在增加桩长的同时减小桩间距, 使复合地基承载力特征值  $f_{spa}$  和单桩承载力特征值  $R_a'$  均满足要求。当

然也可以调整桩径, 但需要按照上述步骤重新计算。如考虑复合地基桩土共同作用下桩间地基土中水平向附加应力可提高桩侧摩阻力, 则更加经济合理, 只是目前关于桩侧阻力的深度效应<sup>[5-6]</sup>和复合地基桩土共同作用下单桩承载力的研究还不够深入, 其机理和规律有待进一步探讨。

对于复合地基承载力的检验, 无论是  $f_{spk}$  还是  $f_{spa}$ , 目前都无合理的直接检验手段, 但可以对复合地基“组件”的承载力进行检验, 最终通过组合验算间接检验复合地基承载力。桩和桩间地基土都是复合地基的“组件”, 设计计算完善了对单桩承载力特征值  $R_a'$  的验算后, 应以  $R_a'$  为单桩承载力特征值的检验目标, 桩间地基土以  $f_{sk}$  为地基承载力特征值的检验目标。根据单桩和桩间土静载荷试验结果, 按式(1)~(5)验算检验  $f_{spa}$ 。

综上所述, 复合地基尤其是有粘结强度增强体的复合地基, 目前其设计计算理论还很不完善, 存在不能自圆其说的情形, 承载力检验同样存在不能反映复合地基真实工作特征的问题, 需要引起业界重视并共同探讨解决, 对此笔者给出如下建议:

(1) 对于有粘结强度增强体的复合地基, 承载力经基础埋深修正后, 设计计算的单桩承载力特征值  $R_a$  可能远小于单桩实际承担的荷载, 应增加经基础埋深修正后复合地基中单桩承载力特征值  $R_a'$  的验算, 根据验算结果适当调整桩长、桩间距等。

(2) 复合地基承载力检验可进行单桩与桩间土静载荷试验, 检验单桩承载力特征值  $R_a'$  和桩间土地基承载力特征值  $f_{sk}$ , 然后根据式(1)~(5)验算检验复合地基承载力特征值  $f_{spa}$ 。单桩复合地基或多桩复合地基静载荷试验检验的力学意义不明确, 试验时的桩土应力状态与实际工况下的应力状态差异较大, 工程意义不大, 可不作为验收检验的方法。

(3) 进一步研究探讨桩土共同作用下复合地基中单桩承载力的计算方法。

(4) 进一步研究探讨有粘结强度增强体复合地基承载力合理经济的检验方法。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground

- Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007 — 2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [3] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 42-67. GAO Dazhao. Soil Mechanics and Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 42-67.
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 345-395. QIAN Jiahuan, YING Zongze. Geotechnical Principles and Calculations[M]. Second Edition. Beijing: China Water & Power Press, 1996: 345-395.
- [5] 龚晓南. 桩基工程手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 11-40. GONG Xiaonan. Pile Foundation Engineering Manual[M]. Second Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 11-40.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ 94 — 2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

## 【简讯】

### 浙江大学教育基金会龚晓南教育基金《地基处理》优秀论文奖获奖名单

本次浙江大学教育基金会龚晓南教育基金《地基处理》优秀论文奖(简称“龚晓南《地基处理》优秀论文奖”)评选活动于2022年1月发布, 评选范围是2019年第1期—2023年第3期在《地基处理》期刊上刊发的327篇论文。评选遵循公开、公平、公正的原则, 由《地基处理》编辑委员会提名、

现场投票, 并结合论文引用频次和下载次数, 最终评选出第一届龚晓南《地基处理》优秀论文奖10篇。

2024年8月3日上午, 第十八届全国地基处理学术讨论会在哈尔滨万达文华酒店顺利开幕, 会上为第一届龚晓南《地基处理》优秀论文奖的获奖作者们颁发了证书和奖金。获奖名单如下:

论文题目	全部作者	年、卷、期、页码
复合地基理论和技术应用体系形成和发展	龚晓南	2019, 1(1): 7-16
微生物加固岛礁地基现场试验研究	刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 丁选明, 方祥位	2019, 1(1): 26-31
确定地基承载力的 $p-s$ 曲线法	杨光华	2022, 4(2): 91-98
超软土快速碳化固化方法与微观机理研究	叶焱, 刘松玉, 蔡光华	2020, 2(2): 91-97
振动碾压对吹填珊瑚砂地基工程特性影响的试验研究	夏玉云, 乔建伟, 刘争宏, 张炜, 郑建国	2020, 2(4): 277-284
基于CPTU测试的高速公路改扩建路基沉降预测方法研究	王才进, 史庆锋, 刘松玉, 何欢, 蔡国军, 常建新, 王蒙	2022, 4(4): 271-278
代理模型方法及其在岩土工程中的应用综述	毛凤山, 陈昌富, 朱世民	2020, 2(4): 295-306
喷射气扰改良排水固结法现场模型试验研究	吴慧明, 龚晓南, 林小飞, 宋词	2019, 1(2): 8-11
碎石桩加固可液化场地工程地震响应分析	邹佑学, 张建民, 王睿	2022, 4(1): 25-31, 64
动三轴试验确定土样动强度指标中的两个问题	陈龙珠, 顾晓强	2021, 3(5): 447-450