

【一题一议】

刚性桩复合地基的载荷试验问题

杨光华

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610)

摘要:《建筑与市政地基基础通用规范》(GB 55003—2021)对刚性桩复合地基承载力验收的条文是:复合地基承载力的验收检验应采用复合地基静载荷试验,对有粘结强度的复合地基增强体尚应进行单桩静载荷试验。在实际工程中,可能会遇到这样的情况:(1)复合地基静载荷试验合格,单桩静载荷试验不合格,复合地基承载力真的不合格吗?(2)复合地基和单桩静载荷试验都合格,复合地基承载力就一定合格吗?本文对此进行了分析讨论,认为与地质条件有关,规范方法主要是针对单一均匀地基的情况,对于多层土地基,规范方法有局限性,由于试验压板尺寸小,压板试验还不能反映深层土的影响。对于大尺寸的基础,还要进行科学的分析,应对实际尺寸的基础沉降进行计算分析,才能判断和保证工程的安全,仅靠小尺寸的压板载荷试验是不够完善的。

关键词:刚性桩复合地基;平板载荷试验;地基承载力;地基处理;复合地基检测试验

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0421-04

The loading test of rigid piles for composite foundation

YANG Guanghua

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, Guangdong, China;

2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, Guangdong, China)

Abstract: *General Code for Foundation Engineering of Building and Municipal Projects* (GB 55003—2021) mandates that the acceptance of the bearing capacity for rigid piles for composite foundation must include the composite foundation loading test and a single pile static loading test as well for those reinforced with bonding strength. In practice, one may encounter scenarios such as: (1) If the composite foundation is qualified to the static loading test but the single pile test fails, does this necessarily indicate that the composite foundation's bearing capacity is inadequate? (2) If both the composite foundation and single pile tests are qualified, does this ensure that the bearing capacity of composite foundation is adequate? This work analyzes and discusses these issues, supposing that they are related to geological conditions. The standard method primarily addresses uniform soil foundations, but it has limitations for multilayer soil foundations due to the small size of the test plate, which cannot fully represent the impact of deeper soil layers. For large foundations, scientific analysis is required, and it is essential to calculate and analyze the settlement for the actual size of the foundation to ensure and assess the project safety. Relying solely on small-scale plate loading tests is not a comprehensive method.

Key words: rigid piles for composite foundation; plate loading test; bearing capacity; ground improvement; composite foundation inspection test

0 引言

刚性桩沉降小,能充分利用天然地基的承载力,是一种较好的地基处理方式^[1]。对刚性桩复合地基的应用和承载力的检验是一个热点问题^[2-4]。如何检验处理后的地基承载力?《建筑与市政地基基

础通用规范》(GB 55003—2021)4.4.8条第6款给出了地基处理验收规定^[5]:复合地基承载力的验收检验应采用复合地基静载荷试验,对有粘结强度的复合地基增强体尚应进行单桩静载荷试验。

对复合地基承载力特征值确定为:

当试验曲线为线性段时,若极限荷载或试验最

收稿日期: 2023-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(52078143)。

作者简介: 杨光华(1962—),男,广东罗定人,博士,教授级高级工程师,主要从事本构理论、基础工程、软土工程及基坑工程等方面的研究、设计及咨询工作。E-mail: 1084242143@qq.com。

大荷载大于线性段最大值的 2 倍,可取线性段的最大值,否则只能取极限值或最大试验荷载的一半。

当试验曲线为光滑曲线时,可按沉降比确定承载力特征值,对以卵石、圆砾、密实粗中砂为主的地基,可取 s/b 等于 0.008 所对应的压力;对以黏性土、粉土为主的地基,可取 s/b 等于 0.01 所对应的压力,但其值不应大于最大加载压力的一半。即从强度而言,需保证安全系数不小于 2。

单桩承载力特征值为单桩极限承载力或最大加载量的一半,保证承载力安全系数不小于 2。

单桩极限承载力确定:(1)变形突变不稳定;

(2)当变形为缓变型时,总沉降量为 40 mm 对应的荷载值,如果桩长超过 25 m,可按 60~80 mm 确定。

显然,无论复合地基或单桩,强度安全系数都是不小于 2 的。

对于刚性桩复合地基的承载力静载荷试验要求是复合地基试验和单桩试验都合格。工程实践中遇到一些案例的情况:

(1)复合地基静载荷试验合格,单桩静载荷试验不合格,复合地基承载力合格吗?

(2)复合地基和单桩静载荷试验都合格,也出现基础沉降过大的问题,说明地基处理后还是不能满足上部结构安全的要求。

那么,复合地基该如何检验才是安全可靠的呢?这应该是与不同的地层条件有关^[6],同时要充分考虑压板试验的尺寸效应,应用地基强度和变形双控的条件去正确认识地基的承载力问题^[7-11],才是较科学全面的方法。对不同的地层条件,判断的方法是不同的。

1 均质土情况

均质土层时,若复合地基静载荷试验合格,即使单桩试验不合格,地基的承载力(强度)也是安全的。因为实际基础的尺寸大于压板尺寸,从地基强度角度看,桩间土的强度承载力由地基承载力理论可知,大尺寸下地基强度承载力大于小尺寸的。同时,大尺寸基础下,地基沉降大,桩分担的承载力大于小尺寸情况,即大尺寸基础时桩的贡献大于小尺寸的载荷试验。因此,大尺寸时的实际基础下复合地基的承载力(强度)大于小尺寸的压板载荷试验,小尺寸下强度承载力满足,自然大尺寸基础的也能满足。当然,这种情况最好还是做一下桩间

土的载荷试验,用于复核桩间土地基的承载力。根据载荷试验确定的地基承载力复核桩的承载力需求,因为这种情况通常是低估了桩间土承载力,同时还需验算加固区下卧层的承载力,下卧层一般超出复合地基压板试验的影响范围,压板载荷试验是不能检测到的。此外,压板载荷试验合格还是不能保证实际大尺寸基础的沉降,尚需复核实际基础下复合地基的沉降。复合地基的沉降计算方法除了规范的方法外^[2,12-13],对于一些特殊情况,可能还需要参考新的方法^[14-17]。

2 存在下卧软弱土层的情况

当地基存在软弱下卧土层时,由于复合地基载荷试验的压板尺寸小,不能反映深部下卧软弱土层的影响,而桩如果没有穿下卧软弱土层或承载力不够时,则实际基础下可能会存在复合地基承载力不足,沉降过大,这时不仅要保证单桩承载力,还要进行实际基础的沉降复核。

如果下卧软弱土层埋藏较深,可能复合地基承载力和单桩承载力都合格,但桩长未穿下卧软弱土层。当实际基础尺寸较大时,也会引起下卧层过大的沉降,甚至超过上部结构的安全要求,引起安全隐患。图 1 所示是某工程的地质剖面图,采用复合地基筏板基础,基础底部持力层地基的承载力特征值为 220 kPa,该层土下面是承载力特征值为 150 kPa 的稍软一点的土层,在灰岩面附近还有更软的土层。采用 CFG 桩复合地基,桩径为 500 mm,桩端要求置于强风化或中风化岩层,单桩承载力特征值为 590 kN,处理后复合地基承载力特征值要求为 500 kPa,完成后进行了 3 根单桩静载荷试验和 4 个单桩复合地基静载荷试验,结果均合格。但房子盖上去后产生了不均匀沉降,在土层较厚的地方沉降达 6~7 cm,要进行处理,该处位置是桩没有进入岩层,而该处正好是灰岩,灰岩面附近一般会有软弱土层,该土层埋藏较深,复合地基压板试验反映不到,而其上的硬土层也比较厚,因而单桩静载荷试验也合格。第一次加固时曾用微型钢管桩,用压力 900 kN 控制,还是无法控制沉降。主要原因是加固桩用压力控制,也没有穿透土层支承到岩层。二次加固时采用了成孔到岩面的桩基进行加固。因此,这种地质情况下,是不能靠小尺寸的压板载荷试验解决的,单桩静载荷试验也要分析具体的情况,还必须对实际基础的沉降进行科学的分析。

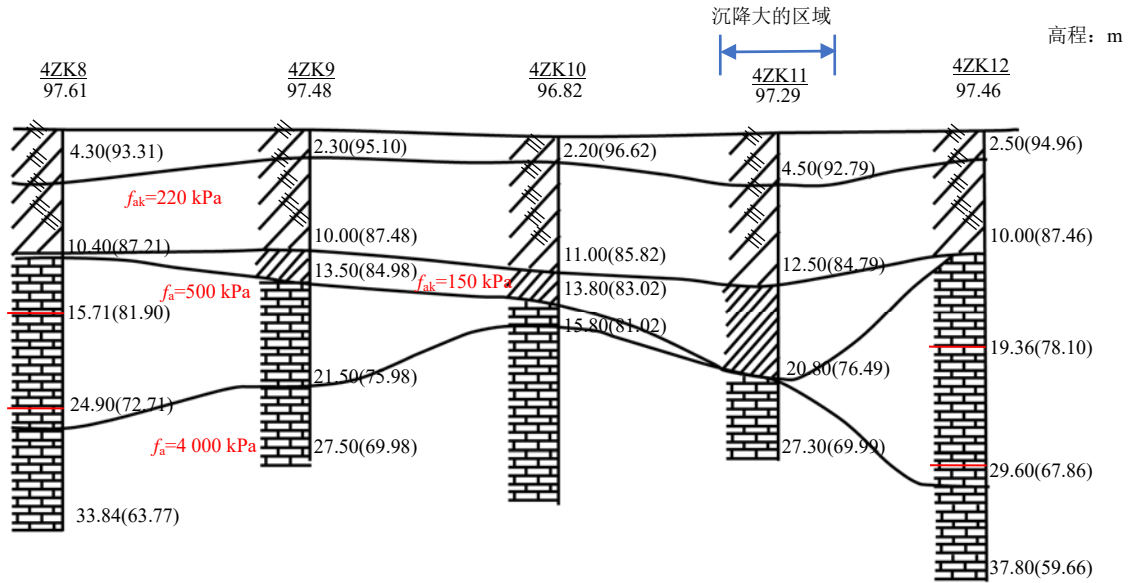


图1 地质剖面图

Fig. 1 Geological profile

3 端承桩的情况

一些岩溶地区采用刚性桩复合地基时，桩端可能会要求置于岩面上，形成端承桩复合地基。也有些工程桩端置于较坚硬的岩土层上，形成端承为主的刚性桩，正如图1的地质条件，一般要求刚性桩端进入强风化或中风化岩层。这类地基一般单桩承载力较高，在这类复合地基中，桩刚度较大，在一些筏板基础中，桩可能承担的荷载会大于设计的荷载，看似基础沉降较小，但由于桩承担了超过设计预定的荷载，反而可能存在风险。因此，这种情况的桩，即使按规范检测都符合要求，还是需谨慎地看待桩的承载能力，要求桩本身有足够的承载能力，同时按照通常规范的等效模量法计算沉降可能也是不合适的^[2,17]。

4 结论

刚性桩复合地基是一种较好的地基处理方式，但其承载力的检验则是一个较复杂的问题。规范的规定其实并不能包含实际工程中的各种复杂情况，需要提高认识，才能保证安全。

由于尺寸效应，复合地基压板载荷试验一般可以保证承载力（强度）安全，但当基础尺寸大于试验压板尺寸时，不一定能保证变形安全，对其局限性，尤其在多层地基时，应要有科学、正确的认识，最终应该按实际基础下地基的强度和变形双控的方

法确定地基的承载力^[10-11]，才是安全可靠的。

参考文献

[1] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
YAN Mingli, ZHANG Donggang. CFG Pile Composite Foundation Technology and Engineering Practice[M]. Second Edition. Beijing: China Water & Power Press, 2006.

[2] 周与诚. 关于限制刚性桩复合地基应用范围的探讨[J]. 建筑技术, 2020, 51(11): 1403-1407.
ZHOU Yucheng. Discussion on limiting application scope of rigid pile composite foundation[J]. Architecture Technology, 2020, 51(11): 1403-1407.

[3] 郑刚, 顾晓鲁. 对刚性桩复合地基承载力检验方法的辨析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(1): 93-96.
ZHENG Gang, GU Xiaolu. Analysis of the bearing test of rigid pile composite foundation[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(1): 93-96.

[4] 杨光华, 李思平. 关于复合地基的静载试验问题[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 683-685.
YANG Guanghua, LI Siping. Problems in determining the bearing capacity of compound foundation with static loading test[C]//Proceedings of the 7th Academic Conference of the Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science and Technology of

- China Press, 2002: 683-685.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑与市政地基基础通用规范: GB 55003—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. General Code for Foundation Engineering of Building and Municipal Projects: GB 55003—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [6] 杨光华, 刘清华, 孙树楷, 等. 刚性桩复合地基承载力计算问题的探讨[J]. 广东水利水电, 2019(12): 1-7.
YANG Guanghua, LIU Qinghua, SUN Shukai, et al. Discussion on bearing capacity calculation of rigid pile composite foundation[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2019(12): 1-7.
- [7] 杨光华. 地基沉降计算的新方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
YANG Guanghua. A New Method for Foundation Settlement Calculation and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [8] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679-686.
YANG Guanghua. New computation method for soil foundation settlements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 679-686.
- [9] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927-1931.
YANG Guanghua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1927-1931.
- [10] 杨光华, 姜燕, 张玉成, 等. 确定地基承载力的新方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 597-603.
YANG Guanghua, JIANG Yan, ZHANG Yucheng, et al. New method for determination of bearing capacity of soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 597-603.
- [11] 杨光华. 确定地基承载力的 $p-s$ 曲线法[J]. 地基处理, 2022, 4(2): 91-98.
YANG Guanghua. Determining foundation bearing capacity of $p-s$ curve method[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(2): 91-98.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 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. Technical Code for Composite Foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [13] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑地基处理技术规范: DBJ/T 15—38—2019[S]. 北京: 中国城市出版社, 2019.
Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: DBJ/T 15 — 38 — 2019[S]. Beijing: China City Press, 2019.
- [14] 杨光华, 苏卜坤, 乔有梁. 刚性桩复合地基沉降计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2193-2200.
YANG Guanghua, SU Bukun, QIAO Youliang. Method for calculating settlement of rigid-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2193-2200.
- [15] 杨光华, 李德吉, 官大庶. 刚性桩复合地基优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 818-825.
YANG Guanghua, LI Deji, GUAN Dashu. Optimization design of rigid pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 818-825.
- [16] 杨光华, 范泽, 姜燕, 等. 刚性桩复合地基沉降计算的简化方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 76-84.
YANG Guanghua, FAN Ze, JIANG Yan, et al. A simplified method for calculating settlement of rigid pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 76-84.
- [17] 杨光华, 徐传堡, 李志云, 等. 软土地基刚性桩复合地基沉降计算的简化方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 21-24.
YANG Guanghua, XU Chuanbao, LI Zhiyun, et al. Simplified method for settlement calculation of rigid pile composite foundation in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 21-24.