

刚性桩复合地基水平承载力特性

屠毓敏, 俞亚南

(浙江大学 土木工程学系, 杭州 310027)

摘要: 利用三维非线性弹性有限元方法, 研究了刚性桩复合地基在不同垂直荷载作用下的水平承载力特性, 分析了不同褥垫层厚度及其地基土的性质对复合地基水平受力特性的影响, 得出了水平荷载作用下桩身弯矩和挠度的分布规律。研究表明, 垂直荷载的大小改变了复合地基水平荷载作用下的破坏模式, 直接影响着其水平承载力; 适当的垫层厚度可降低桩所分担的水平荷载, 有利于桩身的安全。

关键词: 刚性桩复合地基; 水平承载力; 三维有限元

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Characteristics of horizontal bearing capacity of rigid pile composite foundation

TU Yu-min, YU Ya-nan

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The three-dimensional nonlinear elastic finite element method has been developed to study the horizontal bearing capacity behavior of the rigid pile composite foundation subjected to different vertical loads. The influence of the different cushion layer thicknesses and ground property on the horizontal bearing capacity behavior of the rigid pile composite foundation is analyzed. The distribution law of bending moments and deflections along the pile subjected to horizontal load is also obtained. The study results show that vertical load changes the failure mode of the composite foundation under horizontal load, which influences the horizontal bearing capacity of composite foundation. With the cushion layer thickness at proper level, the horizontal load transferred to piles would be decreased and the pile would be safer.

Key words: rigid pile composite foundation; horizontal bearing capacity; three-dimensional finite elements; nonlinear elastic analysis

1 前言

刚性桩复合地基是在地基中置入刚度很大的混凝土桩或CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩), 对不满足承载力或变形要求的地基进行加固所形成的一种人工地基, 它依靠桩与桩间土共同承载以达到提高承载力及减小地基沉降之目的。为充分发挥刚性桩复合地基中地基土的承载能力, 一般要在承台下设置褥垫层, 以达到桩、土共同承担荷载之作用, 因其造价较低, 且与散体材料桩复合地基相比, 能更大幅度地提高地基承载力, 可用于高层建筑的地基处理, 因此在我国建筑工程中得到广泛应用。

在一般的房屋建筑中, 桩基础主要承受竖向荷载的作用, 但在高耸塔型结构或高层建筑中, 除了承受竖向荷载的作用外, 还承受着诸如风力、地震

等水平荷载的作用, 在水平荷载作用下复合地基中的桩会不会导致断裂, 并由此影响建筑物的正常使用, 是值得研究的问题。

目前刚性桩复合地基的研究主要围绕着在垂直荷载作用下的工作性状, 研究在垂直荷载作用下刚性桩的荷载传递规律和桩-土应力的分担, 而对于刚性桩的水平承载力特性则研究得较少。刘光磊等^[1]运用静力弹塑性有限元方法, 分析了刚性桩复合地基在水平荷载作用下的反应规律, 研究表明: 竖向荷载的大小对复合地基的水平承载力以及在水平荷载作用下的破坏模式有所影响, 适当厚度的垫层可减小桩所分担的水平荷载, 有利于桩身的安全。郑刚等^[2]等利用室内模型试验研究了垂直荷载与水平荷载共同作用下的刚性桩复合地基的桩身位移的变化规律, 并研究了褥垫层厚度对桩身位移的影响,

由于模型土为砂土,得出在水平荷载相同的条件下随着垂直荷载的增大,桩身位移随之减小的结论。

由于褥垫层的存在,地基土的水平承载能力也得以发挥,在水平荷载的作用下使得刚性桩复合地基的水平荷载的传递机理以及破坏模式变得非常复杂。褥垫层的特性及作用于复合地基上的垂直荷载将直接影响着刚性桩复合地基的水平承载力特性。为此,本文利用三维非线性弹性有限元模型计算刚性桩复合地基承受水平和垂直荷载共同作用时的桩身挠度和弯矩的变化规律,着重研究不同竖向荷载作用下的水平承载力特性。

2 研究对象及基本假定

本文主要研究刚性桩复合地基在垂直荷载作用下水平承载力特性,为便于与单桩的水平承载力特性进行比较,选取刚性桩复合地基中的刚性桩为单桩,单桩采用边长为 400 mm×400 mm 的方桩,桩长 12 m,褥垫层的尺寸为 2 400 mm×2 400 mm,厚 100~400 mm,即可模拟桩间距为 6 倍桩边长的刚性桩复合地基,计算简图如图 1 所示。

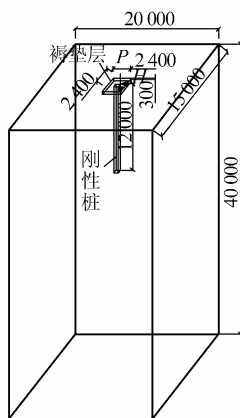


图1 刚性桩复合地基计算简图 (单位: mm)

Fig.1 Calculation diagram of rigid pile composite foundation (unit: mm)

刚性桩位于一般黏性土地基中,假设刚性桩范围内为均质土,土的主要物理力学性指标为:抗剪强度指标 $c=10$ kPa, $\varphi=15^\circ$,天然重度 $\gamma=18.0$ kN/m³。褥垫层的物理力学性指标为:抗剪强度指标 $c=10$ kPa, $\varphi=35^\circ$,天然重度 $\gamma=22.0$ kN/m³。

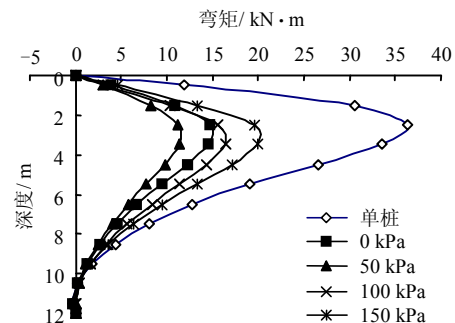
进行刚性桩复合地基三维有限元分析时,假定刚性桩为线弹性材料,取弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.17,以模拟素混凝土刚性桩。地基土为 Mohr-Coulomb 材料,其本构关系服从 Duncan-张非线性弹性 E-B 模型,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \left(1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right)^2 K \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n; \\ B &= K_b \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2p_a} \right)^m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

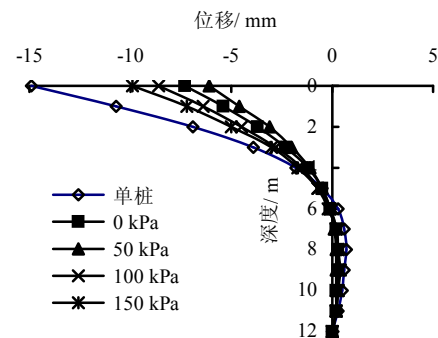
式中: K 、 K_b 、 m 、 n 均为无量纲参数; R_f 为破坏比; c 、 φ 为土的抗剪强度指标。计算时,取 $K=800$, $K_b=200$, $m=0.5$, $n=0.6$, $R_f=0.8$ 。

3 刚性桩复合地基水平承载力特性

根据以上计算参数,进行水平荷载作用下单桩及其刚性桩复合地基的三维有限元分析。图 2 为承受水平荷载为 100 kN 时的桩身弯矩和挠度分布曲线,由图中单桩桩身弯矩及挠度分布规律可知,其规律与桩基的水平荷载试验相吻合,桩身弯矩和挠度均出现反弯点,桩顶位移达到最大值,桩身弯矩最大值位于桩顶下 3.0 m 左右,桩身一侧产生较大的拉应力。进一步研究单桩的水平承载力特性,若水平荷载保持不变,桩顶垂直荷载依次增大至 100, 200 kN 和 400 kN 时桩身弯矩和挠度均保持不变。



(a) 弯矩分布曲线



(b) 位移分布曲线

图2 刚性桩复合地基中桩身弯矩及位移分布

Fig.2 Distribution of bending moment and deflection along the pile in the rigid pile composite foundation

对刚性桩复合地基在承受水平荷载为 100 kN 及垂直荷载依次为 0, 50, 100 kPa 和 150 kPa 时的情况进行三维有限元分析, 计算时取褥垫层厚度为 300 mm。计算表明, 由于褥垫层的存在, 作用于桩上的弯矩和挠度将大大减小。作用于复合地基上的垂直荷载的大小对其桩身的受力特性产生很大的影响; 与无垂直荷载作用时的情况相比较, 当垂直荷载为 50 kPa 时, 其桩身最大弯矩减小 22 %、最大挠度减小 23 %; 当垂直荷载为 100 kPa 时, 其桩身最大弯矩增大 12.5 %, 最大挠度增大 17.8 %; 当垂直荷载为 150 kPa 时, 其桩身最大弯矩增大 36.3 %, 最大挠度增大 35.6 %。

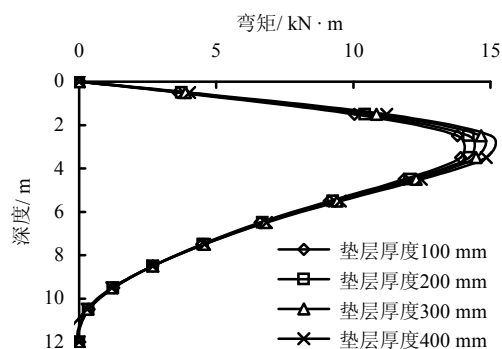
在刚性桩复合地基中, 由于褥垫层的刚度及强度均比地基土要大, 褥垫层的存在对刚性桩起到约束作用, 致使桩身弯矩和位移大大降低。由图 2 可见, 在相同水平荷载的作用下, 单桩的最大弯矩和位移比刚性桩复合地基中的桩基(无垂直荷载作用时)大 1.483 倍和 1.041 倍。

在水平荷载的作用下, 褥垫层与地基土之间的界面产生剪切, 即褥垫层可承担一部分水平荷载。众所周知, 界面之间的剪切与其所受的正应力密切相关, 当增大正应力时界面间的剪切力也随之增大, 则褥垫所承担的水平荷载也随之增大, 但当正应力继续增大时, 褥垫下的地基土不能承受上部荷载的作用而导致局部屈服, 这样刚性桩复合地基的水平承载力反而降低。由此看来, 刚性桩复合地基在不同的垂直荷载作用时的水平承载力与刚性单桩的水平承载力是截然不同的, 由于褥垫-桩-地基的共同作用, 使其水平承载力机理变得十分复杂。

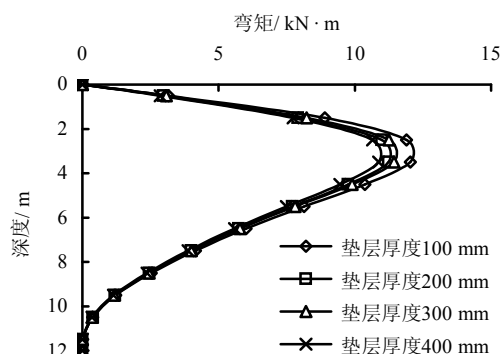
4 褥垫层厚度对水平承载力特性的影响

刚性桩复合地基的承载力是依靠褥垫-桩-地基之间的共同作用来实现的, 由于褥垫层的存在, 在垂直荷载的作用下刚性桩可以刺入褥垫层内, 从而使桩间土能承受更大的荷载, 以实现桩土的共同作用, 褥垫层的厚度、桩间土的性质以及桩的特性直接影响着刚性桩复合地基的承载能力, 以下将主要研究褥垫层的厚度对刚性桩复合地基水平承载力的影响。

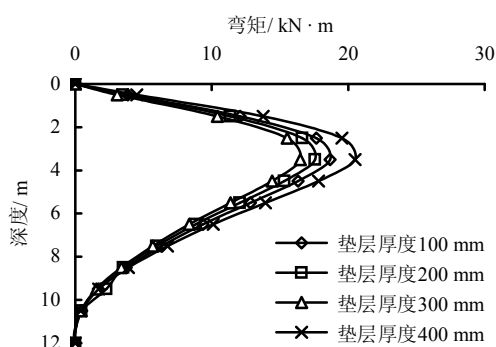
褥垫层是刚性桩复合地基设计的核心, 复合地基的许多特性均与褥垫层有关, 褥垫层一般由级配良好的中粗砂或碎石组成, 其厚度一般为 100~300 mm^[3]。现取厚度为 100, 200, 300 mm 和 400 mm 褥垫层, 研究褥层厚度对桩身弯矩分布的影响。图 3 为水平荷载为 100 kN, 垂直荷载依次为 0, 50, 100 kPa 和 150 kPa 时的桩身弯矩分布。



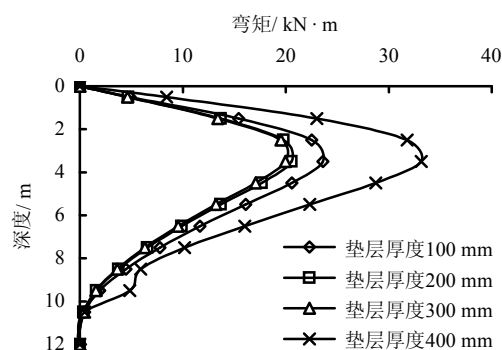
(a) 垂直荷载 0 kPa



(b) 垂直荷载 50 kPa



(c) 垂直荷载 100 kPa



(d) 垂直荷载 150 kPa

图 3 褥垫层厚度对桩身弯矩的影响

Fig.3 The influence of the cushion layer thickness on the bending moment of the pile

由图 3(a)和图 3(b)可知,当垂直荷载较小时,垫层厚度对桩身的弯矩影响不大,而当垂直荷载增大时,褥垫层厚度对桩身弯矩的影响较大,如图 3(c)和图 3(d)。垫层厚度过小时,在较大垂直荷载作用下桩间土很容易产生屈服,桩间土承载能力不能充分发挥,相反要达到设计承载能力,应减小桩距,从而增加桩数,不能达到刚性桩复合地基设计的目的。若褥垫层的厚度过大,褥垫层的刚度也随之增大,会导致桩土之间的应力比接近于 1,则在较大的垂直荷载作用下,桩间土由于承受较大的垂直荷载的作用而产生屈服,最终导致作用于桩上的水平荷载增大,桩身弯矩也随之增大。由图 3(c)和图 3(d)亦可见,当垂直荷载较大时,褥垫层厚度为 200 mm 和 300 mm 的复合地基中的刚性桩所承受的弯矩均较小,而褥垫层厚度为 300 mm 时刚性桩所承受的弯矩为最小。

5 结 论

通过对刚性桩复合地基在不同垂直荷载作用下的水平承载力特性进行的三维非线性弹性有限元分析,着重研究了位于一般黏性土地基中刚性桩的水平承载力特性,同时对工程界所关注的褥垫层厚度问题进行较详细地研究。通过计算分析,可得出如下结论:

(1) 在刚性桩复合地基中,由于褥垫层的存在,可以大大提高其桩基的水平承载能力。

(2) 褥垫层的厚度直接影响着刚性桩复合地基的水平承载力特性,过大或过小的褥垫层厚度都会增大刚性桩的弯矩和挠度,不利于桩基的安全,应合理选择褥垫层的厚度,从本文计算中可得,褥垫层的厚度宜取 200~300 mm 为宜。

参 考 文 献

- [1] 刘光磊,宋二祥. 刚性桩复合地基水平受力性能有限元分析[J]. 工业建筑, 2004, (11): 41—44.
LIU Guang-lei, SONG Er-xiang. Finite element analysis of rigid pile composite foundation under horizontal load[J]. *Industrial Construction*, 2004, (11): 41—44.
- [2] 郑刚,刘双菊. 刚性桩复合地基在水平荷载作用下工作性状的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2005, (8): 865—868.
ZHENG Gang, LIU Shuang-ju. Experimental study on behavior of rigid pile composite ground under horizontal load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, (8): 865—868.
- [3] 阎明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

上接第 2328 页

参 考 文 献

- [1] Klym T W, Radhakrishna H S. 杆塔基础的螺旋锚板[J]. 王钊译. 冯国栋校. 土工基础, 1991, 5(2): 39—45.
Klym T W, Radhakrishna H S. Helical anchored plate of tower foundation[J]. Translated by Wang Zhao. Collated by Feng Guo-dong. *Soil Engineering and Foundation*, 1991, 5(2): 39—45.
- [2] 王钊,刘祖德,程葆田. 螺旋锚的试制和在基坑支护中的应用[J]. 土木工程学报, 1993, 26(4): 47—53.
WANG Zhao, LIU Zu-de, CHEN Bao-tian. Trial production of screw anchor and its application to fencing foundation pit[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1993, 26(4): 47—53.
- [3] 周红安. FRP 螺旋锚和预制混凝土框架护坡技术研究[硕士论文 D]. 武汉大学, 2004.
- [4] 中国腐蚀与防护学会,李国莱等. 合成树脂及玻璃钢(修订版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.
- [5] Brahim Benmokrane, Burong Zhang, Adil Chennouf. Tensile properties and behavior of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2000, (14): 157—170.
- [6] 王钊,王协群,李丽华. 蠕变试验和蠕变折减系数[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 723—727.
- [7] GBJ 112—87, 膨胀土地区建筑技术规范[S].
WANG Zhao, WANG Xie-qun, LI Li-hua. Creep tests and creep reduction factor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(5): 723—727.