

文章编号:1673-2049(2018)04-0081-08

高应力作用下 CFG 桩复合地基承载变形机制

鄧 彬,武李和乐,王 番,王永鑫,李 戈

(西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:为探究水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)复合地基在高应力下的承载变形机制,基于西安市高新区拟建场地 CFG 桩复合地基高应力现场试验建立数值模型并进行分析。结果表明:该场地 CFG 桩复合地基的极限承载力不小于 1 666 kPa;褥垫层在高应力作用下发生破坏,其协调桩土共同作用能力降低;桩顶向上刺入褥垫层,荷载向桩顶集中,致使桩承担上部荷载的 96.5%;桩间土发挥作用能力受限,复合地基相当于单桩承载;褥垫层的厚度与桩土应力比的增长呈现负相关;桩间土与桩顶的沉降差随着荷载的增加而增加,且随着褥垫层厚度的增大呈现先增大再减小的趋势;当单桩承载力满足要求时,为保证高应力下桩间土不因荷载过大而造成复合地基的破坏,应适当减小褥垫层的厚度,降低其流动补偿能力;所得结论可为 CFG 桩复合地基在高层建筑地基处理设计提供参考。

关键词:CFG 桩复合地基;高应力试验;褥垫层;桩土应力比

中图分类号:TU472.2

文献标志码:A

Bearing Deformation Mechanism of CFG Pile Composite Foundation Under High Stress

ZHI Bin, WU-LI He-le, WANG Pan, WANG Yong-xin, LI Ge

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the deformation mechanism of cement fly-ash gravel pile (CFG pile) composite foundation under high stress, the numerical model of CFG pile composite foundation was established and analyzed based on the high stress test of planning site in Xi'an high-tech zone. The results show that the ultimate bearing capacity of CFG pile composite foundation in the site is not less than 1 720 kPa. The cushion layer is damaged under high stress, and the coordination ability about combined action of pile and soil is reduced. The pile top is thrust upward into the cushion layer, and the load is concentrated to the pile top, which causes the pile to bear 96.5% of the upper load. The capacity of soil between the piles is limited, and the composite foundation is equivalent to the single pile bearing. The cushion thickness is negatively correlated with the increase of pile-soil stress ratio. The settlement difference between soil and pile top increases with the increase of load, and the settlement difference increases firstly and then decreases with the increase of cushion thickness. When the bearing capacity of single pile meets the requirements, in order to ensure that the soil between piles under high stress is not damaged due to overloading, the cushion thickness should be reduced and the flow compensation

收稿日期:2017-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41172262);陕西省重点科技创新团队计划项目(2014KCT-30)

作者简介:鄧 彬(1972-),男,河北易县人,副教授,工学博士,E-mail:xianzhibin@163.com。

ability should be reduced. The conclusion can provide reference for the design of CFG pile composite foundation in the foundation treatment of high-rise buildings.

Key words: CFG pile composite foundation; high stress test; cushion; pile-soil stress ratio

0 引言

水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)与桩间土在褥垫层的变形协调作用下共同承担基础与上部荷载,它能够大幅度地提高地基承载力、减少工后沉降,并能有效地消除地基的差异变形^[1]。因此,CFG 桩复合地基在中国已经获得了广泛的实际应用,也取得了一定的研究成果。周爱军等^[2]探究了不同厚度、不同材料的褥垫层对桩土应力比的影响。刘鹏等^[3]得到了刚性桩复合地基承载性状受基础尺寸大小变化的影响规律。黄生根^[4]研究了不同褥垫层厚度和模量对复合地基承载能力的影响。丁小军等^[5]通过埋设土压力盒、孔隙水压计、沉降计等测试元件,依托储油罐工程开展 CFG 桩复合地基变形与承载特性试验研究,认为采用 CFG 桩处理饱和黄土地基是可行的。郑刚等^[6]对 CFG 桩复合地基褥垫层的工作机理进行了分析,并设计了 CFG 桩复合地基模型试验,研究了 CFG 桩复合地基褥垫层在竖直荷载作用下的工作性状。以上研究成果极大地丰富了复合地基的应用理论,具有十分重要的实际意义,但是大多数研究主要集中在承载力特征值小于 600 kPa 荷载作用下展开^[7-12],缺少对承载力特征值大于 600 kPa 高应力荷载下的 CFG 桩复合地基极限承载力探究。CFG 桩复合地基能不能适用于高应力荷载条件,在高应力荷载条件下的变形特征是什么,在高应力下其桩-土-褥垫层相互之间的作用机制关系是怎样,如何调整设计能使得 CFG 桩复合地基适用于高应力条件,这些问题的研究目前都不十分清楚。随着城市化进程加剧、高层以及超高层建筑 CFG 桩复合地基的普及使用,原有的相关理论已经不能适用于现阶段的工程实践,导致了以上这些问题急需得到解决。因此,研究 CFG 桩复合地基在高应力作用下承载性状与变形机制成为解决此类工程实际问题的重要途径。本文依托西安高新区某项目 CFG 桩复合地基的竖向增强体高应力静荷载试验,探究 CFG 桩复合地基在高应力作用下的承载性状及变形机制,并利用 FLAC 3D 建立模型进行计算,探究在高应力水平下 CFG 桩复合地基的承载性状,进一步阐明复合地基的承载作用机制。所得结论可为高层以及超高层建筑 CFG 桩复合地基设计提供参考。

1 试验研究

1.1 工程地质概况

拟建场地位于西安市南郊高新技术产业开发区,场地地貌单元属皂河Ⅱ级阶地。项目由 1 栋 32 层高层建筑物、裙楼(2 层)及地下车库组成。地质情况为:①杂填土,成分杂乱,结构松散,厚度 0.5~2 m;②黄土状土,土质较为均匀,以坚硬、硬塑状态为主,厚度 5.3~7.9 m;③中细砂,以细砂和粉细砂为主,级配一般,厚度 2.2 m;④黄土,土质均匀,具大孔性,硬塑状态,厚度 2.1~4.2 m;⑤古土壤,土质均匀,具团块状结构,可塑,厚度 2.5~4.7 m;⑥粉质黏土,土质均匀,属中压缩性土,厚度 3.9~7.9 m;⑦中粗砂,以石英、长石为主,饱和,密实,厚度 0.3~1.2 m;⑧粉质黏土,土质均匀,属中压缩性土,厚度 1.7~5.6 m。由于天然地基承载力难以满足上部荷载的要求,因此采用 CFG 桩复合地基进行加强处理。

1.2 试验概述

根据已有的研究成果和相关工程实践经验,常规情况下 CFG 桩复合地基静荷载试验所考虑的承载力特征值一般小于 600 kPa,且不会造成复合地基破坏。本次试验不考虑复合地基承载上限,不断施加荷载直至复合地基破坏,故可以认为承载力特征值高于 600 kPa 的静荷载试验或造成复合地基发生破坏的试验为高应力静荷载试验。本次试验选取长度 21 m 桩试验区 3 个,桩直径 0.4 m,桩距 1.5 m,试验区编号分别为 SZ1, SZ2, SZ3。试验前在复合地基顶面铺 150 mm 厚的中粗砂层,再将一直径 1.58 m、厚 36 mm、弹性模量 210 GPa 的圆形刚性承压板放置在褥垫层上;该试验采用慢速维持荷载法,以堆积重物为反力,加荷设备为 630 t 油压千斤顶,压力量测采用标准压力表,首级加荷为 240 kPa,后每级以 120 kPa 的压力递增至 1 200 kPa,再以每级 60 kPa 的压力递增至极限状态,进行高应力试验。试验装置如图 1 所示,现场荷载试验如图 2 所示。

1.3 试验方法

沿承压板边缘均匀布置 4 块百分表(量程为 0~30 mm),百分表与承压板中心等距,测量复合地

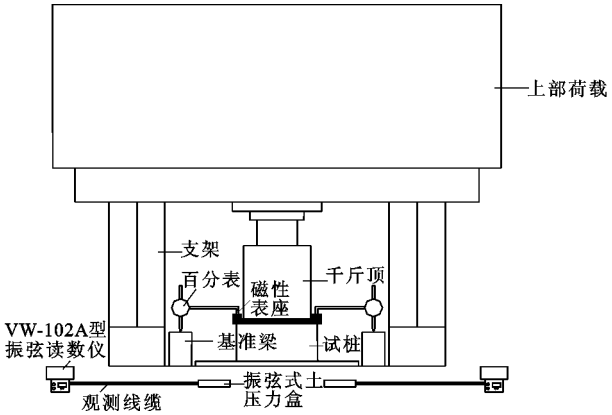


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Test Device



图 2 现场荷载试验

Fig. 2 Field Load Test

基沉降量。

试验方法：

- (1)每级荷载前后均应读数 1 次,之后每隔 30 min 再读 1 次。
- (2)承压板沉降相对稳定标准为 1 h 内承压板沉降量不超过 0.1 mm。
- (3)待其承压板沉降速率稳定后,再施加下一级荷载。

在粗砂层中将 VWE 型振弦式土压力盒埋置在桩侧与桩顶测定桩间土与桩顶应力。桩侧土压力盒具体埋置方法如下:在距桩周 20 cm 左右处挖一个能保证土压力盒正常埋置和工作的圆形深坑,坑底部垫入少量细砂,保证坑底水平,将边长为 180 mm、厚 20 mm 的方形钢板置入坑底并压实,土压力盒放置在钢板上,引出连接线检测土压力盒是否正常工作,然后将另一块同样规格的钢板压在土压力盒上保证受力均匀,坑内用细砂填满避免产生空隙。最后用地基土掩埋深坑并压实,土压力盒现场埋置

情况如图 3 所示。

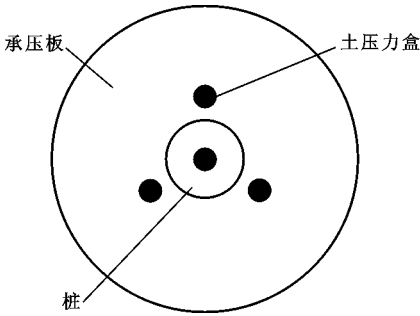


图 3 土压力盒现场埋置情况

Fig. 3 Site Embedment of Earth Pressure Boxes

1. 4 试验结果分析

1. 4. 1 CFG 桩复合地基荷载-沉降量 (P - S) 曲线分析

根据百分表所测数据,取其平均值得到复合地基静荷载试验结果,绘制的 P - S 曲线如图 4 所示。

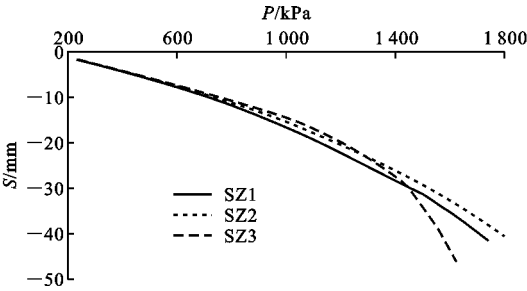


图 4 高应力作用下复合地基 P - S 曲线

Fig. 4 P - S Curves of Composite Foundation Under High Stress

由图 4 可知:复合地基沉降量呈现递增的趋势,加载到 1 300 kPa 时,SZ3 曲线出现明显拐点,沉降量开始急剧增加,但未出现陡降,当沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍时,停止加载,对应荷载 1 620 kPa;SZ1 与 SZ2 曲线则一直为缓变型,当 SZ1 与 SZ2 沉降量达到 -40 mm 时,分别对应荷载 1 740 kPa 和 1 800 kPa。此时承压板周围土明显挤出,依据规范,认为此时复合地基已经破坏,故停止加载。该场地 CFG 桩复合地基的破坏模式为沉降量过大与承压板周围土的侧向挤出造成的,桩体均未发生冲刺或者剪切破坏。综上,CFG 桩复合地基极限承载力可达到 1 666 kPa,承载力特征值可超过 833 kPa。

1. 4. 2 CFG 桩复合地基应力分析

通过动态测量仪测量土压力盒读数,得出桩顶应力、桩间土应力、桩顶分担荷载比率随荷载变化曲线,如图 5~7 所示。

由图 5,6 可知,从加载开始到结束,在复合地基

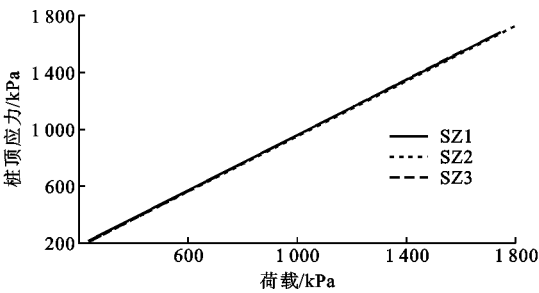


图 5 桩顶应力随荷载变化曲线

Fig. 5 Change Curves of Pile Top Stress with Load

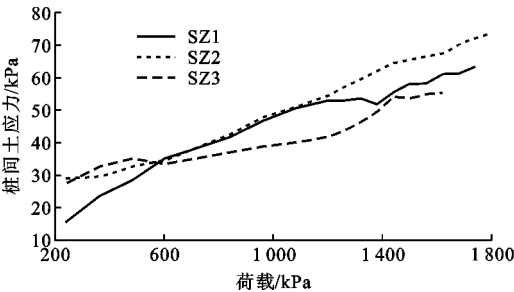


图 6 桩间土应力随荷载变化曲线

Fig. 6 Change Curves of Soil Stress Between Piles with Load

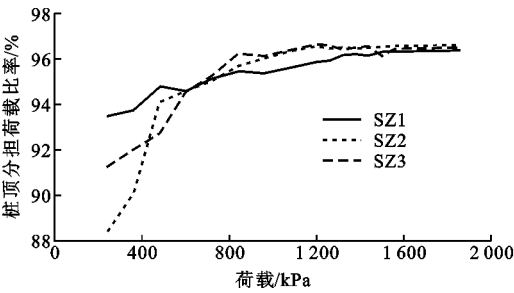


图 7 桩顶分担荷载比率随荷载变化曲线

Fig. 7 Change Curves of Load Sharing Ratio of Pile Top with Load

中单桩应力与桩间土应力均增加,但单桩应力的增加量(约 1 500 kPa)明显大于桩间土应力增加量(约 50 kPa)。由图 7 可知,在加载初期,SZ1,SZ2,SZ3 试验区桩所分担的荷载占总荷载的比率分别为 93.5%,88.5%,91.2%。3 个试验区桩顶分担比率存在一定差距,分析原因认为试验场地褥垫层在铺设时其厚度与模量存在一定的差距,造成在分担上部荷载时存在差距。随着荷载的增加,桩顶所分担荷载比率的变化趋势为先增加后逐渐趋于稳定。当荷载达到 1 200 kPa 时,桩顶分担荷载比率稳定在 96.5%左右,且不再随荷载的增大而增大。可见高应力下桩间土发挥承载作用能力有限,复合地基相当于单桩承载。

在高应力作用下,由于桩间土发挥作用有限,可以认为当单桩承载力满足工程要求时,复合地基承

载力同样满足工程要求。

2 数值模拟

2.1 模型建立

利用有限差分软件 FLAC 3D 建立桩-土-褥垫层三维模型,如图 8 所示,土体采用摩尔-库仑模型,桩体和荷载板采用线弹性模型,桩长取 21 m,桩直径取 400 mm,桩间距取 1.5 m,考虑对称和直观效果,模型 1/4 对称,整体模型尺寸为 6 m×6 m×42 m。模型的侧面和底面采用固定约束,表面为自由边界。同时对桩体与土体之间采用 interface 桩接触处理,如图 9 所示。

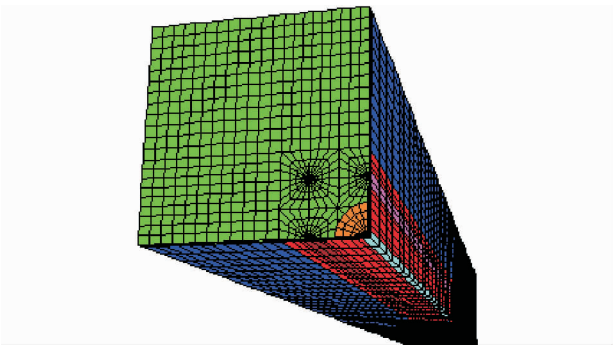


图 8 计算模型

Fig. 8 Calculation Model

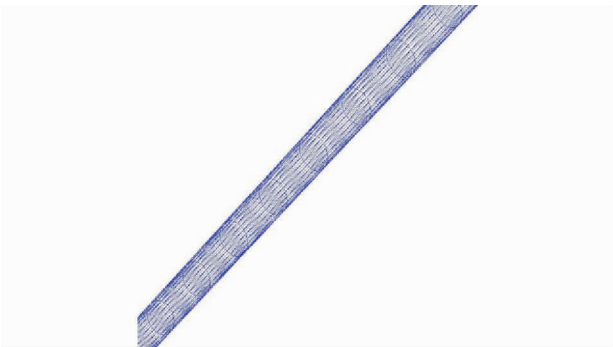


图 9 接触面示意图

Fig. 9 Schematic Diagram of Contact Surface

法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 取接触周围“最硬”相邻区域等效刚度的 10 倍,即

$$k_n = k_s = 10 \max \left[\left(K + \frac{4}{3} G \right) / \Delta z_{\min} \right] \quad (1)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量; Δz_{\min} 为接触面法向方向上连接区域最小尺寸,本模型取 0.5。

桩界面摩擦参数 c, φ 取相邻土层 c, φ 加权平均值的 80%。具体接触面参数见表 1。

依据现场勘察报告,在确定泊松比 ν 及弹性模量 E 的基础上根据下列公式(2)确定数值模拟所需

剪切模量 G 及体积模量 K ,其模型参数整理如表 1 所示。

$$\left. \begin{aligned} K &= E/3(1-2\nu) \\ G &= E/2(1+\nu) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

表 1 材料特性值

Tab. 1 Characteristic Values of Materials

材料名称	体积模量 K/Pa	剪切模量 G/Pa	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	厚度/ m	k_n 或 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
黄土质土	4.89×10^6	2.95×10^6	1 780	28	25	6.50	
中细砂	8.07×10^6	4.58×10^6	1 850	0	25	2.20	
黄土	4.68×10^6	2.91×10^6	1 720	30	24	3.50	
古土壤	4.82×10^6	2.58×10^6	1 840	35	25	5.10	
粉质黏土	4.66×10^6	2.75×10^6	1 760	35	22	7.20	
中粗砂	9.99×10^6	5.67×10^6	1 900	0	35	2.20	
粉质黏土	4.66×10^6	2.75×10^6	1 780	35	22	6.50	
荷载板	1.05×10^9	3.5×10^9					
桩体	$5\,411 \times 10^6$	$5\,217 \times 10^6$					
褥垫层	5.18×10^6	2.19×10^6	1 900	0	38	0.15	
接触面				30	20		1×10^8

层上部、桩顶处及桩间土处设置位移与应力监测点,记录整个加载过程位移变化。

选取 SZ2 试验区复合地基 P - S 曲线模拟值与实测值进行对比。由图 10 可知,模拟得出的沉降变化曲线相对实测曲线较缓,在荷载大于 1 800 kPa 之后,实测值与模拟值的差距有逐渐增大的趋势。当荷载小于 1 800 kPa 时,模拟值与实测值吻合度较好,验证了该模型的合理性。

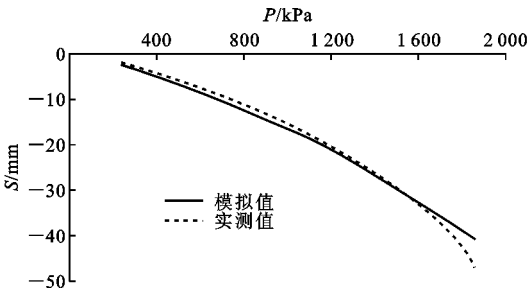


图 10 P - S 曲线模拟值与实测值对比

Fig. 10 Comparison of P - S Curves Between Simulated Values and Measured Values

2.3 不同褥垫层厚度与模量的模拟分析

由现场试验可知,由于 CFG 桩复合地基在高应力下的承载能力受褥垫层影响较大,故选择现场较易控制的褥垫层厚度作为研究对象探究其承载能力与变形机制。

图 11 为不同褥垫层厚度下桩土应力比随荷载变化曲线。由图 11 可知:不同褥垫层厚度 h 下的桩土应力比均表现持续上升的趋势,当褥垫层较厚时桩土应力比增长幅度较小;当褥垫层厚度较薄时,桩

2.2 计算模型检验

模型首级加荷为 240 kPa,然后每级以 120 kPa 的压力逐步递增至 1 200 kPa,再以每级 60 kPa 的压力递增,至 1 860 kPa 时终止加载。分别在褥垫

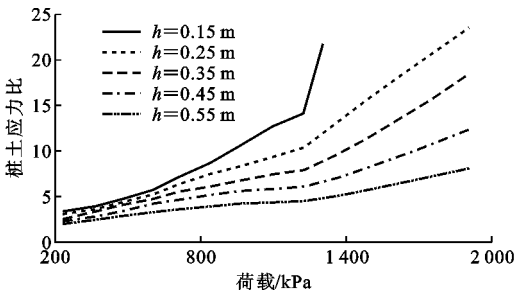


图 11 不同褥垫层厚度下桩土应力比随荷载变化曲线

Fig. 11 Change Curves of Pile-soil Stress Ratio with Load Under Different Thickness of Cushion

土应力比增长幅度较大;在荷载大于 1 200 kPa 后其桩土应力比增长较快。图 12 为 660~1 860 kPa 区间 6 个不同荷载条件下的桩顶与桩间土沉降差随褥垫层厚度变化关系,当褥垫层厚度小于 0.35 m 时,桩间土与桩的沉降差随着褥垫层厚度的增大而增大。最大沉降差 4.90 mm。当褥垫层厚度大于 0.35 m 时,桩与桩间土沉降差减小。随着荷载的增加,桩土沉降差增加量逐渐增大。

3 承载变形机制分析与特性对比

3.1 高应力下 CFG 桩复合地基变形机制分析

根据 CFG 桩复合地基高应力荷载试验数据,采用 FLAC 3D 建立数值模型,对复合地基受力规律及变形特性进行分析,总结得到其受力变形机制如下:

(1)高应力导致褥垫层发生破坏,具体表现为侧向挤出、边缘隆起、压密等,褥垫层厚度降低,调节桩

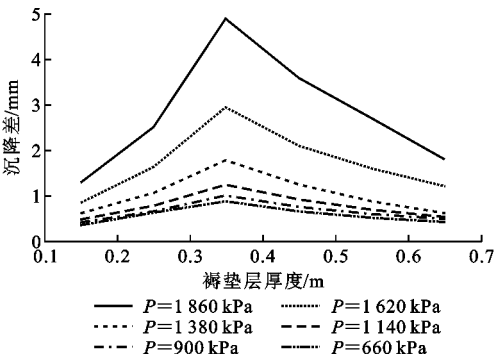


图 12 不同荷载下桩顶与桩间土沉降差随褥垫层厚度变化曲线

Fig. 12 Change Curves of Settlement Difference Between Pile Top and Pile Soil with Load Under Different Cushion Thickness

土共同作用的能力减弱,桩间土承担荷载量减少,导致桩顶分担荷载比率逐渐上升。

(2)复合地基在受到荷载作用时,由于桩间土模量远低于 CFG 桩身模量^[13],受荷产生沉降相对较大,桩间土与 CFG 桩之间产生沉降差 δ_1 ,在褥垫层的流动补偿作用下,可看作是桩顶向上刺入褥垫层,如图 13 所示。桩间土与 CFG 桩沉降差越大,则 CFG 桩刺入褥垫层程度越大。荷载在褥垫层的传递规律类似如图 13 虚线所示,桩顶受荷大小随着刺入褥垫层程度的增加而增加,荷载逐渐向桩顶转移^[14],导致桩顶分担荷载比率逐渐上升。

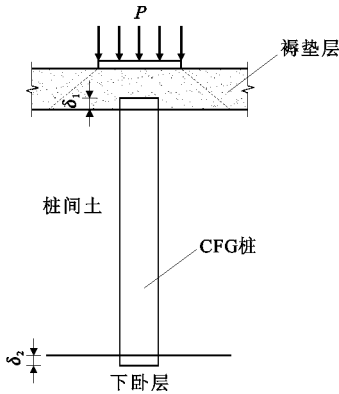


图 13 CFG 桩变形

Fig. 13 Deformation of CFG Pile

(3)当桩土沉降差出现时,负摩阻力开始发挥作用,其与逐渐增加的桩顶荷载共同限制了桩顶进一步刺入褥垫层;荷载的增加又使得桩间土受力增加,桩间土位移量增加。随着荷载增加,桩土沉降差进一步拉大,中性点位置下移,负摩阻力增强,桩端向下刺入下卧层,产生位移 δ_2 ,桩承担荷载能力减弱,桩间土承担荷载量急剧上升,位移发生陡降,复合地

基被破坏。

(4)由于褥垫层具有调节桩土应力比的作用^[15-16],且荷载通过褥垫层较多地传向刚度较大的桩,较少部分传向桩间土^[17-18],而厚度较小的褥垫层在高应力作用下易发生破坏,其调节桩土共同作用能力降低。同时褥垫层厚度较小,也易于桩顶向上刺入,使得荷载更易向桩顶集中,桩土应力比表现为持续增加。这与前述分析得出的结论相吻合。虽然增大褥垫层厚度可降低沉降差,同时也能缓解桩顶应力集中程度^[19],但此时由于褥垫层过厚,CFG 桩视为置换作用,失去了承载价值。

(5)桩间土模量远小于桩身模量,当荷载增加时,桩间土产生更大的位移。当褥垫层厚度增加时,褥垫层的变形协调能力增强,较多的荷载被传递到桩间土上,桩间土沉降量增加,与桩的沉降差增加。当褥垫层厚度超过 0.35 m 时,CFG 桩承载作用降低且置换作用增加。因此在工程实践中,在低应力作用下时,褥垫层厚度可取 0.35 m 左右,该厚度能充分发挥桩间土的承载能力,这与前人结论相吻合^[20-26];在高应力作用下,复合地基相当于单桩承载,若此时将荷载过多地转移到桩间土上,易造成桩间土沉降过大,增大与桩的沉降差,增加负摩阻力,桩易向下发生刺入破坏。这与前述结论相吻合,因此,为保证复合地基在高应力下不发生破坏,在确保单桩承载力满足要求的前提下,应减小褥垫层厚度以降低其流动补偿能力。

3.2 CFG 桩复合地基承载变形特性对比分析

由于 CFG 桩复合地基在低应力下的变形特性包含在整个高应力试验过程中,故可对高、低应力下 CFG 桩复合地基承载变形特性进行对比分析。

(1)低应力下褥垫层未发生破坏,具有一定调节桩土共同作用的能力,部分荷载被转移到桩间土上,桩土共同作用明显;高应力下褥垫层发生破坏,调节桩土共同作用能力降低,荷载向桩顶集中,相当于单桩承载。

(2)低应力下,桩间土受荷较小,其变形较小,桩土沉降差较小,桩身所受负摩阻力较小;高应力下,虽然复合地基相当于单桩承载,但随着上部荷载增加,桩间土受荷量依然不断增加,桩间土变形增加,桩土沉降差增加,负摩阻力增加,桩身受荷增加。

4 结 语

(1)依据现场试验,该场地 CFG 桩复合地基极限承载力可以达到 1 666 kPa。承载力特征值可超

过 833 kPa。

(2)在高应力作用下,桩承受荷载达到总荷载的 96.5%。此时,桩间土发挥作用有限,复合地基相当于单桩承载。可以认为,当单桩承载力满足设计要求时,复合地基承载力一定满足要求。在高层建筑复合地基设计时,为保证安全,在增强 CFG 桩体强度的同时不应将桩间土承载能力考虑在内。

(3)高应力作用下由于褥垫层承载能力有限,褥垫层易发生破坏,其调节桩土共同作用能力降低;同时桩顶易刺入褥垫层,导致荷载向桩端集中,桩土应力比持续增加。

(4)由于桩间土承载能力有限,为保证复合地基在高应力下不发生破坏,在确保单桩承载力满足要求的前提下,应减小褥垫层厚度以降低其流动补偿能力。

参考文献:

References:

- [1] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.
ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art Techniques for Ground Improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.
- [2] 周爱军,栗冰.CFG桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析[J].岩土力学,2010,31(6):1803-1808.
ZHOU Ai-jun, LI Bing. Experimental Study and Finite Element Analysis of Cushion in CFG Pile Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1803-1808.
- [3] 刘鹏,杨光华,范泽,等.刚性桩复合地基尺寸效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):187-200.
LIU Peng, YANG Guang-hua, FAN Ze, et al. Experimental Study on Scale Effect of Rigid Pile Composite Foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 187-200.
- [4] 黄生根.CFG桩复合地基现场试验及有限元模拟分析[J].岩土力学,2008,29(5):1275-1279.
HUANG Sheng-gen. Test Study and Finite Element Analysis of CFG Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1275-1279.
- [5] 丁小军,王旭,张延杰,等.大型油罐CFG桩复合地基变形与承载性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1851-1857.
DING Xiao-jun, WANG Xu, ZHANG Yan-jie, et al.

Experimental Study of Bearing and Deformation Features of CFG-pile Composite Ground for Large Oil Storage Tanks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1851-1857.

- [6] 郑刚,刘双菊,伍止超.不同厚度褥垫层刚性桩复合地基工作特性研究[J].岩土力学,2006,27(8):1357-1360.
ZHENG Gang, LIU Shuang-ju, WU Zhi-chao. Study on Behavior of Rigid Pile Composite Ground with Different Cushion Thickness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1357-1360.
- [7] 丁铭绩.高速铁路CFG桩桩板复合地基工后沉降数值模拟[J].中国铁道科学,2008,29(3):1-6.
DING Ming-ji. Numerical Simulation on the Post-construction Settlement of CFG Pile-slab Composite Foundation in High-speed Railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 1-6.
- [8] 杨生彬,邵卫信,王吉元.CFG桩复合地基受力性状三维数值模拟研究[J].岩土力学,2008,29(12):3431-3436.
YANG Sheng-bin, SHAO Wei-xin, WANG Ji-yuan. Research on 3D Numerical Simulation of Working Mechanism of CFG Pile Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3431-3436.
- [9] 王铭,杨更社,叶万军,等.西安地区黄土冲洪积层CFG桩复合地基承载力可靠度分析[J].西安科技大学学报,2016,36(4):534-540.
WANG Ming, YANG Geng-she, YE Wan-jun, et al. Reliability Analysis of Load Capacity of Loess Alluvium and Diluvium CFG Piles Compound Foundation in Urban Area of Xi'an[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(4): 534-540.
- [10] 李玉根,郅彬,赵高文,等.CFG桩处理风积砂土地基承载性状研究[J].中国科技论文,2016,11(1):43-48
LI Yu-gen, ZHI Bin, ZHAO Gao-wen, et al. Study on the Bearing Properties of Aeolian Sand Foundation Treated with CFG Piles [J]. China Sciencepaper, 2016, 11(1): 43-48.
- [11] 王瑞芳,雷学文.刚性桩复合地基应力及沉降规律数值分析[J].工业建筑,2004,34(11):49-53.
WANG Rui-fang, LEI Xue-wen. Numerical Analysis of Stress and Settlement Law of Rigid Piles Composite Foundation[J]. Industrial Construction, 2004, 34(11): 49-53.
- [12] 张建伟,戴自航.CFG桩复合地基褥垫层效用的有限元分析[J].岩土力学,2005,26(增):171-174.
ZHANG Jian-wei, DAI Zi-hang. Finite Element Analysis of Functions of Cushion of Cement Flyash Gravel

- Pile Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 171-174.
- [13] 潘纪顺, 刘志伟, 姬计法, 等. CFG 桩复合地基承载性状的试验研究[J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 92-94.
PAN Ji-shun, LIU Zhi-wei, JI Ji-fa, et al. The Test Research About the Loading Behavior of CFG Pile Composite Foundation[J]. Geology and Exploration, 2001, 37(4): 92-94.
- [14] 贾剑青, 王宏图, 李 晶, 等. CFG 桩复合地基承载力分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(9): 117-120, 127.
JIA Jian-qing, WANG Hong-tu, LI Jing, et al. Analysis of Bearing Capability of CFG Pile Composite Foundation[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(9): 117-120, 127.
- [15] 邓跃光, 黄 荣. CFG 桩复合地基的原理和设计[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 69-72.
DENG Yue-guang, HUANG Rong. The Theory and Design of CFG Composite Foundation[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(3): 69-72.
- [15] 化建新, 董长和, 孙东晖. CFG 桩垫层效应研究[J]. 岩土工程技术, 1998, 43(1): 48-50.
HUA Jian-xin, DONG Chang-he, SUN Dong-hui. The Study of Cushion Influence on CFG Piles [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1998, 43(1): 48-50.
- [16] 王长科, 郭新海. 基础-垫层-复合地基共同作用原理[J]. 土木工程学报, 1996, 29(5): 30-35.
WANG Chang-ke, GUO Xin-hai. Interaction of Foundation-cushion-composite Ground Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(5): 30-35.
- [17] 王 兵, 杨为民, 李占强, 等. 褥垫层对复合地基承载特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 403-408.
WANG Bing, YANG Wei-min, LI Zhan-qiang, et al. Test Study on Influence of Cushion on Loading Behavior of Composite Foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 403-408.
- [18] 李 宁, 韩 焯. 褥垫层对复合地基承载机理的影响[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 68-73, 83.
LI Ning, HAN Xuan. Study on Mechanism of Cushion in Composite Pile Foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 68-73, 83.
- [19] 刘 杰, 张可能. 复合地基中垫层作用机理[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2001, 32(6): 568-572.
LIU Jie, ZHANG Ke-neng. The Mechanism of Cushion in Composite Foundation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2001, 32(6): 568-572.
- [20] 韩云山, 白晓红, 梁仁旺. 垫层对 CFG 桩复合地基承载力评价的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3498-3503.
HAN Yun-shan, BAI Xiao-hong, LIANG Ren-wang. Cushion Influence on Bearing Capacity of Composite Foundation with Cement-flyash-gravel Piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3498-3503.
- [21] 李雪峰, 乔世范, 刘宝琛. CFG 桩复合地基褥垫层作用机理及合理厚度研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(增 1): 482-485.
LI Xue-feng, QIAO Shi-fan, LIU Bao-chen. Research of Mattress Layer Mechanism of CFG Pile Composite Foundation and It's Reasonable Thickness[J]. Industrial Construction, 2016, 46(S1): 482-485.
- [22] 黄 成. 褥垫层厚度对复合地基承载力的影响[J]. 甘肃科学学报, 2017, 29(3): 53-57.
HUANG Cheng. Effect of Cushion Thickness on the Bearing Capacity of Composite Foundation[J]. Journal of Gansu Sciences, 2017, 29(3): 53-57.
- [23] 李守德, 顾文强, 赵 波. 褥垫层对刚性短桩复合地基承载特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 246-250.
LI Shou-de, GU Wen-qiang, ZHAO Bo. Study on the Influence of Cushion in PHC Pile Composite Foundation[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 246-250.
- [24] 温立平, 罗贵欣, 赵 彦, 等. 高层建筑桩筏基础中褥垫层厚度的讨论[J]. 施工技术, 2013, 42(增): 69-71.
WEN Li-ping, LUO Gui-xin, ZHAO Yan, et al. Analysis on Thickness of Thick in Interaction Between Pile and Soil in Tall Building[J]. Construction Technology, 2013, 42(S): 69-71.
- [25] 郭海庆, 杨 毅, 王振宇. 褥垫层对 CFG 桩复合地基加固作用的分析研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2013, 35(2): 56-60.
GUO Hai-qing, YANG Yi, WANG Zhen-yu. Analysis of Effect of Cushion on CFG Pile Composite Foundation Reinforcing[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2013, 35(2): 56-60.
- [26] 徐继欣, 张 鸿, 周院芳, 等. 褥垫层厚度对复合地基 CFG 桩土应力比影响的试验研究[J]. 公路工程, 2012, 37(3): 59-62, 126.
XU Ji-xin, ZHANG Hong, ZHOU Yuan-fang, et al. Experimental Study on Effect of Cushion Thickness to Pile Soil Stress Ratio of CFG Composite Foundation[J]. Highway Engineering, 2012, 37(3): 59-62, 126.