

利用 FLAC3D 软件对夯扩 CFG 桩复合地基承载性能的研究

李 坛 赵其华 梁璋彬 何文秀 姚 巍
(成都理工大学环境与土木工程学院)

摘 要 结合工程实例,采用莫尔库仑屈服准则,利用 FLAC3D 软件建立基础的三维数值模型模拟夯扩 CFG 桩复合地基中桩体与土的相互作用,讨论了夯扩 CFG 桩复合地基中桩及土层的荷载传递规律。

关键词 FLAC3D CFG 桩 复合地基 荷载传递

FLAC3D 是一个面向土木工程、水利、石油及采矿工程、环境工程的通用数值分析软件,内置多种本构模型,可以模拟多种岩土材料类型,可实现对岩石、土和支护结构等建立高级三维模型、进行复杂的岩土工程数值分析与设计;具有运行速度快及能模拟分步开挖、大变形大应变、非线性及非稳定系统(甚至大面积屈服/失稳或完全塌方)等诸多有限元程序难以模拟的复杂工程问题。

1 工程实例

川北医学院附属医院住院楼(以下简称住院楼)总占地面积约 2000m²,总建筑面积为 27577 m²,框架剪力墙结构,建筑物高度为 69.3m,层数为 20 层,设一层地下室,基础埋深为自然地坪以下 6.60~7.50,建筑物安全等级为一级,为 I 类高层建筑,采用筏板基础方案,CFG 桩复合地基,在该大楼施工之前,该大楼旁边已经有一栋 14 层的住院楼于 1997 年投入使用,采用的是沉管灌注桩基础。按照建设单位对新建住院大楼的建筑要求,新建住院大楼建成以后应与已有住院大楼连成一体,作为一栋整体的住院大楼使用。为了能够有效解决两栋建筑物的差异沉降,采用的承载力特征值为 500~600kPa 的 CFG 复合地基桩。建筑场地地形平坦,相对高差仅约 0.50m,地貌上属嘉陵江水系 I 级阶地。住院楼所处地段的土层分布自上而下为:素填土(1.0~3.4m)、粉土(5.6~12.10m)、粉砂(0.2~5.0m)、粉质粘土(0.4~2.4m)、砾砂(0.5~2.6m)、圆砾(0.5~2.6m)、卵石(1.2~4.1m)、强风化泥岩(1.5~2.0m)、中风化泥岩(>5.0m)(根据《夯扩干硬性混凝土桩复合地基工程特性的试验研究现场工点试验研究报告》)。

2 计算模型

由于如果选取整个建筑基础所生成的模型单元数量太大,且外围的桩对基础中心部位桩的影响很小,故只取部分桩进行分析。模型选取的六行五列的三角形布置的 CFG 桩(图 1)。

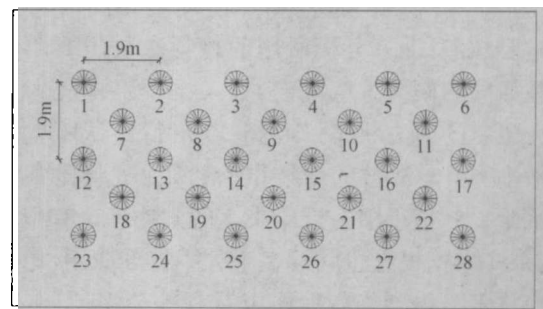


图 1 CFG 桩布置图

模型的具体参数为:模型长 65.5m、宽 37m、高 31.2m;基础长 13.1m、宽 7.4m、厚 3.0m,基础埋深 6.2m;褥垫层厚 0.6m;桩的直径为 0.6m,长 11m,横向间距 1.9m,纵向间距 1.9m。桩、基础、褥垫层和土的材料参数如下表所示。土的侧压力系数取 0.5。在模型的竖直面施加滑动支座,而在模型的底部施加铰支座。土层采用莫尔-库仑弹塑性模型,基础及褥垫层采用线弹性体模型,土层及基础的材料参数根据《夯扩干硬性混凝土桩复合地基工程特性的试验研究有限元数值分析报告》,具体参数见表 1。

为了更好的反映桩体和周围土体的相互作用,桩体采用 FLAC3D 内置的桩结构单元模拟,每根桩分成 11 段。桩结构单元在 FLAC3D 网格中的作用使通过剪切和法向的连接弹簧实现的。这种弹簧是非线性结点,通过它使得桩单元结点与寄宿域网格结点之间传递了力和运动。剪切连接弹簧特性与土

泥浆的剪切特性的描述很类似。法向连接弹簧特性包括模拟反向荷载以及在桩和岩土介质网格之间的间隙,基本上是用来模拟桩周介质对桩周的挤压效果。在桩结点和围岩网格之间的相对位移而产生的剪切力由连接弹簧曲线剪切刚度表示如式(1)所示^[1]:

$$\frac{F_s}{L} = cs_{stiff}(u_p - u_m) \quad (1)$$

式中: F_s —剪切连接弹簧产生的剪切力(沿桩单元和网格单元交界面); cs_{stiff} —连接弹簧的剪切刚度; u_p —桩的轴向位移; u_m —岩土介质面的轴向位移; L —作用的单元长度。

单位长度桩的法向力如式(2)所示^[2]:

$$\frac{F_n}{L} = cs_{nstiff}f(u_p^n - u_m^n) \quad (2)$$

式中: F_n —法向耦合弹簧的法向力(沿桩单元和网格单元界面); cs_{nstiff} —耦合弹簧的法向刚度; u_p^n —垂直于桩轴方向的桩的位移; u_m^n —垂直于桩的轴向方向的界面的位移(土或岩石); L —有效单元长度。

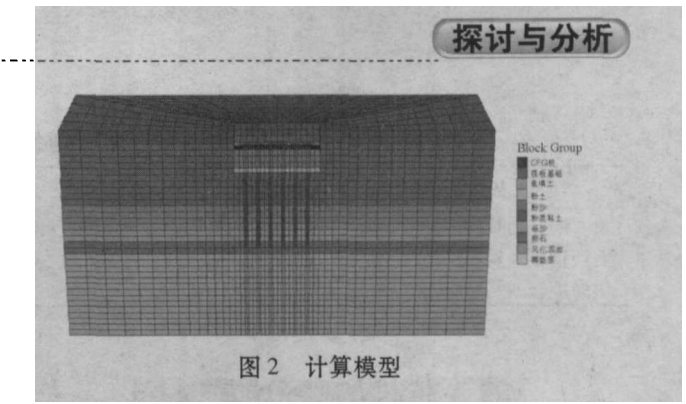
桩的材料参数的选取:假设桩—岩土破坏是发生在岩土中,剪切耦合弹簧摩擦角和剪切耦合弹簧的粘结强度的底限是与岩土的内摩擦角和岩土粘聚力乘以桩的周长有关,此处取为 10° 和 0° 。桩单元的具体参数见表2。FLAC^{3D}生成的桩默认并没有考虑端承作用,为了表现桩端与土的相互作用以发挥桩的端承作用,在桩的两端分别加上法向屈服弹簧,其面积为 0.28 ,刚度为 3.45×10^{10} ,压缩屈服强度为 $2.1 \times 10^4 \text{ N}$ 。

建立出的模型如图2所示(为了能看到内部的桩和褥垫层,模型沿 xOz 平面切开)。

表1 土层及基础的材料参数

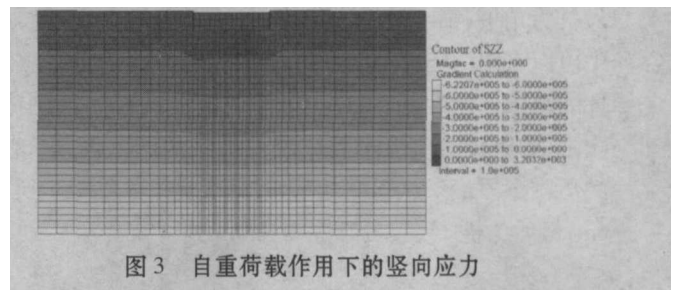
类型	深度/m	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	变形模量/Pa	剪切模量/Pa	粘聚力/Pa	内摩擦角/($^\circ$)
素填土	2.2	1.8	3.033×10^6	1.083×10^6	1×10^4	15
粉土	11.05	1.8	5.050×10^6	1.927×10^6	1×10^4	10
粉砂	13.65	1.8	4.578×10^6	1.774×10^6	0	10
粉质粘土	15.05	1.8	5.050×10^6	1.927×10^6	1×10^4	10
砾砂	16.6	2.0	1.5×10^7	6.15×10^6	0	30
卵石	18.15	2.1	2.5×10^7	1.016×10^7	0	35
风化泥岩	31.2	2.3	4.5×10^7	1.875×10^7	1×10^5	45
褥垫层	\	2.1	2.5×10^7	1.016×10^7	\	\
筏板基础	\	2.5	3.0×10^{10}	1.282×10^{10}	\	\

桩的端部桩的端承作用有所体现,具体表现为桩下土层和桩顶处的应力集中。对比上面两幅土可以看出未考虑桩的端承作用时,桩四周土体的应力有较大的增加,部分在群桩内土体的应力等值线一直延伸到了褥垫层底部,桩的底部受力均匀。与之相对照,增加桩的端阻力后,桩周围的土体较受力前应力



3 模拟过程

首先只施加自重应力,不加装桩体,让模型在自重应力下达到平衡,平衡时所得到的应力分布如图3所示。之后对模型的位移及塑性状态清零,安装桩体并在基础顶部施加上部荷载,其值为 223 kPa ,用1000个时步分50次均匀增加,同时记录下桩上各点在各个时刻的轴力数据。上步荷载达到指定荷载后,保持荷载恒定直到模型达到平衡,计算总共持续29000个时步。



4 数据分析

(1) 地基受力分析:桩附近的竖向正应力云图及桩身轴力如图4所示。从图4(a)上可以看出在

增加的相对较少,在桩所在位置处土体应力明显减小,而在桩底的应力集中现象却较为明显,应力最大值由未考虑端阻效应情况的 $-4.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 增加到 $-6.0 \times 10^5 \text{ Pa}$,增加了约1/3。由于桩体底部位于卵石层,这种考虑对提高基础的承载力是有利的。

表2 桩结构单元模型参数

参数名及单位	数值	参数名及单位	数值	参数名及单位	数值
单元的外周长/m	1.88	剪切耦合弹簧刚度/ $N \cdot m^{-2}$	3.45×10^{10}	剪切耦合弹簧的粘结强度/ $N \cdot m^{-1}$	0
剪切耦合弹簧摩擦角/ $^{\circ}$	10	法向耦合弹簧刚度/ $N \cdot m^{-2}$	3.45×10^{10}	法向耦合弹簧的粘结强度/ $N \cdot m^{-1}$	0
法向耦合弹簧摩擦角/ $^{\circ}$	0				

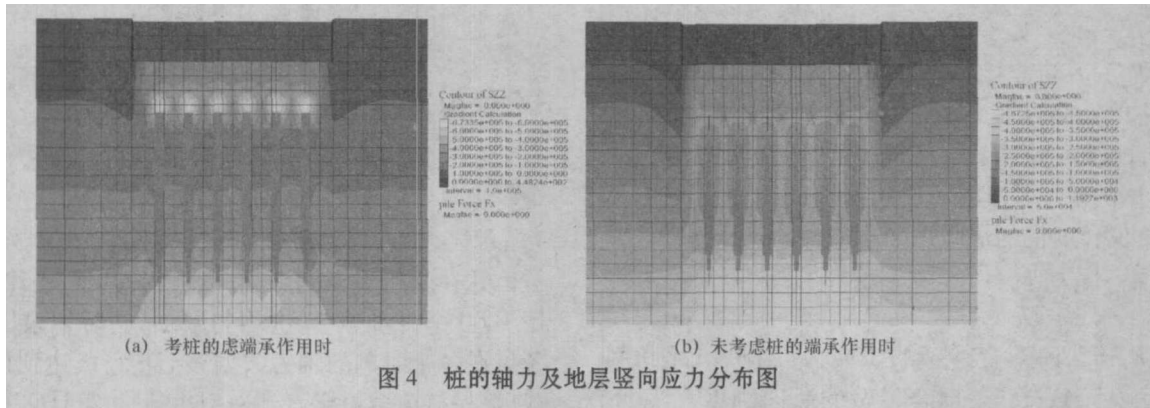


图4 桩的轴力及地层竖向应力分布图

(2) 桩体受力分析:图5为桩的轴力图,图中第1号桩为角桩,第4号桩为边中桩,第14号桩为中桩,从中可以看出由于群桩效应造成中部的各桩比实际应发挥的承载作用偏低,导致边桩承受的荷载较大,边中桩次之,中桩较大。由于褥垫层对荷载的调节作用,桩1的负摩擦段最长从0m到-3m;其次是桩4,为0m到-4m;最后为桩14,其负摩擦力为0m到-5m。

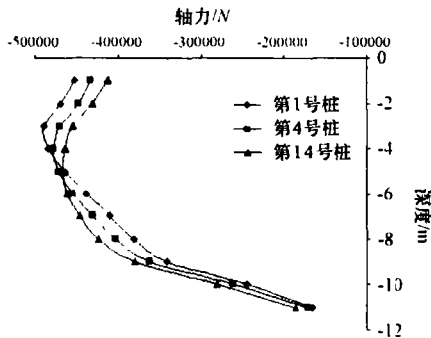


图5 桩的轴力图

从图6可以看出桩顶处应力的变化规律,由于应力有一个由承台向土传递的过程,其应力经历了一个由小变大,之后又由大变小的过程,最开始桩顶处的内力增长较快,之后逐渐变慢。曲线的变化总体上是一个上升规律,其原因是在外荷载作用下桩和桩间土都要发生变形,在任一时刻桩顶的沉降,桩间土的沉降均不相同。在加荷初期由于褥垫层的变形作用,桩向褥垫层内刺入,出现负摩擦阻力,因此桩顶的荷载分担比土层顶部要小。在1900时步后,应力基本不再变化。在三根桩中,桩土应力比增加最快的是第1号桩,其次是4号桩,之后是第14号桩。

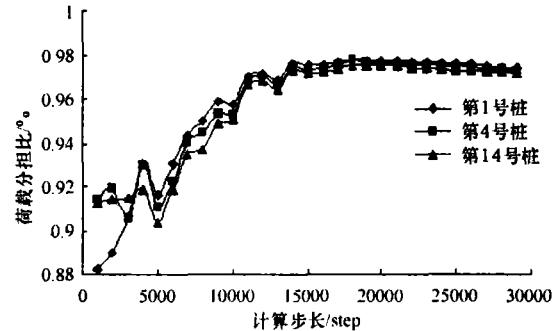


图6 桩土应力比变化图

5 结论

(1) 夯扩 CFG 桩由于采用了夯扩的桩头,桩身的受力比较均匀,可以充分利用桩底土层的承载能力,较普通 CFG 桩更能充分提高地基的承载力。

(2) 由于采用了桩端传力,桩侧土层的应力改变比较小,不容易产生冲剪破坏。

(3) 在群桩中由于褥垫层的作用桩顶均出现负摩擦阻力,中桩的负摩擦阻力区域范围最大,中边桩次之,角桩最小。桩顶反力角桩最大,中边桩次之,中桩最小。

(4) 桩土荷载分担比随着土体的固结,呈现斜率逐渐减小的上升趋势。

参考文献

[1] FLAC3D Online Manual [EB]. Minneapolis, Minnesota 55401 USA: Itasca Consulting Group, Inc, 2003: 81-103[2007, 3].

第一作者通讯地址:成都二仙桥东三路1号成都理工大学榕树园研究生公寓5单元4-2 邮编:610000