

# 基于结构受力状态理论的群桩基础承载力研究

赵俭斌<sup>1</sup>, 薛允杰<sup>1</sup>, 王 启<sup>2</sup>, 赵维新<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 吉林建筑科技学院土木工程学院, 吉林 长春 130114;  
3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

**摘 要** 目的 将结构受力状态理论应用于群桩基础的承载力判定, 推广计算群桩基础安全容度和降低材料浪费的方法, 为群桩设计提供有力依据。方法 依托沈阳航空航天大学图书馆现场静载试验, 通过 ABAQUS 有限元模拟软件建立群桩基础模型, 应用结构受力状态理论分析实测数据与模拟数据, 精确判定群桩基础工作过程中的弹塑性分支荷载与失效荷载, 并与当前规范理论获取的荷载判定结果进行对比。结果 在考虑群桩效应等不利因素的前提下, 所判定的群桩承载力在保证安全的同时, 相较于以控制沉降为 40 mm 方式得到的群桩基础设计荷载提高了 21.6%, 失效荷载比极限荷载大 770 kN。结论 弹塑性分支荷载可以直接作为群桩基础的设计荷载, 从极限荷载至失效荷载这一区间经证明群桩结构可以正常工作, 可作为群桩基础的安全裕度使用, 为研究群桩基础承载力提供了新方法。

**关键词** 群桩基础; 有限元模拟; 结构受力状态理论; M-K 判定方法; 极限承载力

中图分类号 TU473.1 文献标志码 A

## Research on the Bearing Capacity of Group Pile Foundation Based on the Theory of Structural Stress State

ZHAO Jianbin<sup>1</sup>, XUE Yunjie<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, ZHAO Weixin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Jilin University of Architecture and Technology, Changchun, China, 130114; 3. China Construction Third Engineering Bureau, The First Construction Engineering Co. Ltd., Wuhan, China, 430040)

**Abstract:** In order to study the application of the theory of structural stress state to the determination of bearing capacity of group pile foundation, to popularize the method of calculating the safety capacity of group pile foundation, to reduce the waste of materials, and to provide a strong basis for the design of group piles. Based on the static load test results in the library of Shenyang Aerospace University, the group pile foundation model was established by ABAQUS

收稿日期: 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978422)

作者简介: 赵俭斌(1960—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土与地下工程等方面研究。

finite element simulation software, and the structural state of force theory was applied to analyze the measured and simulated data to accurately determine the elastic-plastic branch load and failure load during the working of group pile foundation, and to compare with the load determination results obtained from the current code theory. It is found that under the premise of considering the group pile effect and other unfavorable factors, the determined bearing capacity of the group pile is 21.6% higher than the design load of the group pile foundation obtained by controlling the settlement of 40 mm, and the failure load is 770 kN more than the ultimate load in terms of load. The elastic-plastic branch load can be directly used as the design load of group pile foundation, and the interval from ultimate load to failure load is proved that the group pile structure can work normally, and it can be used as the safety margin of the group pile foundation, which provides a new method for the study of the bearing capacity of group pile foundation.

**Key words:** group pile foundation; finite element simulation; theory of structural stress state; M-K determination method; ultimate bearing capacity

在实际工程中,单独一个桩无法为地基提供足够的承载力和稳定性,故建筑物的群桩地基一般由承台和土体中的众多基桩共同组成。与单桩承载力的测定不同,受制于现场条件、经济因素等问题,通常无法进行群桩基础的现场试验,只进行单桩的静载荷试验来评价整体地基的承载能力。但由于群桩效应的存在,群桩基础在受竖向荷载后,群桩基础中的承台、桩、土体之间的相互作用使桩侧摩阻力、桩端阻力、沉降等性状与单桩基础明显不同,承载力往往不等于各单桩承载力之和<sup>[1]</sup>。群桩承载力的取值方式多样,根据《建筑地基基础技术规范》(DB21/T 907—2015),一般通过群桩承载力去验算单桩承载力是否符合对应的特征值。王志斌等<sup>[2]</sup>采用控制沉降的方式,取沉降值 40 mm 时的荷载为群桩基础的极限荷载;但群桩基础受到桩间距、持力层、桩长等多种因素影响<sup>[2-3]</sup>,受力情况较为复杂,大部分研究的关注点都集中于群桩基础所具有的极限荷载与相应破坏形式,加载过程中的各种微小变化却受到了忽略,结构破坏的本质是塑性的累积,因此对群桩基础的加载阶段进行详细的研究是很有必要的,而且上述研究都面临同一个难题,即无法准确预测群桩基础的工作

性能。周广春等<sup>[4]</sup>提出了结构受力状态理论,着眼于寻求结构失效的起点,通过对试验数据和模拟数据再建模并采用相应分析方法去探索其中隐含的、未知的结构工作行为规律,与现有结构设计中以具有不确定性的极限荷载或峰值荷载为参考相比,以结构开始出现破坏的荷载值为参考可能更为合理,因为这一荷载是可以通过计算准确得到的。周广春等<sup>[5-8]</sup>通过这一理论可能揭示出两个物理规律:①不同荷载情况下适用于各种结构、构件和试件的结构破坏规律;②各向同性和均质材料的强度规律。这两个规律涵盖了结构承载力和材料强度,可能会影响目前的结构分析和设计范式,为先进的结构设计奠定基础。

结构受力状态理论目前不仅在连续混凝土弯梁桥<sup>[9]</sup>、钢管混凝土拱和钢管混凝土柱<sup>[10-11]</sup>以及不锈钢-砼-钢管组合构件<sup>[12]</sup>等建筑构件或结构中都得到了应用,还在地下工程如地下管道<sup>[13-15]</sup>的研究中进行了验证,同时也在墙板有限元数值模拟<sup>[16]</sup>、哑铃形拱模型<sup>[17]</sup>等有限元领域得到了印证。鉴于此,笔者将结构受力状态引入群桩基础的承载力判定中,与现规范理论结合运用,依托 ABAQUS 有限元分析软件建立群桩基础承载力计算模型,并对不同荷载下群桩基础受

力状态进行分析,完善群桩承载力的计算方式,为该理论在实际工程的应用提供合理化的建议。

## 1 结构受力状态理论

### 1.1 弹塑性分支点与失效荷载点

在结构受力变形过程中,遵循自然界由量变转化为质变的工作特征,随着荷载增大,结构发生变形累积并会在某个荷载下发生质的变化,失去原有的受力状态模式而变化为另一种不同的受力状态模式<sup>[18]</sup>。因结构保持原有受力状态并维持其功能是结构正常使用的基本条件,而一旦基本条件都不能维持,结构将进入失去基本效能状态,将结构受力状态由一种模式转化为另一种模式的规律性特征称为“结构失效”,所对应的点称为“结构失效荷载点”<sup>[18]</sup>,这是结构失效的起点,此时结构仍处于能够工作而不至于破坏的状态,在这点之后结构开始出现失稳区,虽然能够继续承受荷载,但整体结构已不具有稳定性,随时都可能发生破坏。当前常用的设计荷载取值方法是将极限荷载除以相应的安全系数,但是极限荷载具有不确定性,以不确定的极限荷载折减获得的设计荷载也不可避免的具有不确定属性。而出现在失效荷载点之前的弹塑性分支点为结构由弹性阶段转变为弹塑性阶段的分界点,是结构受力状态中弹性量变积累阶段,没有或仅有少量塑性变形,作为理论准确判定的特征荷载,其直接作为设计荷载是具有足够的安全裕度的,具体表现为:一是弹塑性分支荷载到失效荷载的确定性安全裕度;二是失效荷载到极限荷载的半确定性安全裕度。所以笔者通过结构受力状态理论去寻求群桩基础的“弹塑性分支荷载”与“失效荷载”,并通过有限元模拟从结构工作的全过程进行受力状态分析,验证失效荷载作为有限元模拟终止加载条件的合理性等问题。

### 1.2 广义应变能密度

结构所具有的应变、位移是结构在测点的受力状态值,可以用来表示结构受力状态模式特征参数。由于应变、位移具有方向性且会随荷载的增加而发生改变,在用应变、位移表示结构受力状态模式和特征参数时,难以实现共性的、一般性的统一。周广春教授<sup>[4]</sup>参考应变能密度,提出了采用广义应变能密度参数来描述结构受力状态特征对,以规避应变或位移所具有的方向性。广义应变能密度计算公式:

$$\begin{cases} E_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^j \varepsilon_{ik}^2; \\ E_{ij} = \int_0^{\varepsilon_j} \varepsilon_i d\varepsilon. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_{ij}$ 为第*i*个测点在第*j*个荷载作用下的广义应变能密度值; $\varepsilon_{ik}$ 为第*i*个测点在第*k*个荷载作用下的应变值。

以式(1)来计算所得到的广义应变能密度就具有了一般性,不同受力状态特征也可以进行对比分析。在进行不同模拟情况的处理时,由于应变增量的不同,通常会造成广义应变能密度的不同,为更好比较分析在不同结构和变量条件下的广义应变能密度曲线变化的特征性,将其进行归一化处理得到:

$$E_{j,\text{norm}} = E_{ij} / E_{\text{max}}. \quad (2)$$

式中: $E_{j,\text{norm}}$ 为进行归一化处理之后的广义应变能密度值; $E_{\text{max}}$ 为各级荷载对应的  $E_{ij}$  最大值。

### 1.3 Mann-Kendall 判定准则

采用结构受力状态理论对结构进行分析,其目的是为了揭示结构的受力状态的演变特征,以及内在的工作机理。对结构受力状态进行分析,其本质是对结构受力状态建模,以获取结构受力状态特征对,并使用判定准则揭示结构受力状态特征对的规律性特征,因此引入 Mann-Kendall (M-K) 非参数统计方法来对结构的受力进行趋势判定。M-K 准则是一种趋势分析工具,通常不需要样本

符合某些分布或视图的干扰,这意味着一些由系统误差、初始缺陷引起的数值也可以参与趋势判定<sup>[17]</sup>,M-K 法计算步骤如下:

在第  $k$  加载步定义随机变量  $d_k$  为

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i, 2 \leq k \leq n. \tag{3}$$
$$m_i = \begin{cases} +1, E'_2(i) > E'_2(j), & 1 < j < i; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \tag{4}$$

式中:  $m_i$  为样本的累积数。  $m_i$  的平均值  $E(d_k)$  和方差  $Var(d_k)$  按式(5)、式(6)计算:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}. \tag{5}$$
$$Var(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, 2 \leq k \leq n. \tag{6}$$

在假设  $\{E'(i)\}$  序列是统计独立的情况下,定义了一个新的统计量  $UF_k$ :

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of each soil layer

土层	深度/m	重力密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
人工填土	0~0.7	16.9	2.5	0.30	34.3	8.4
粉土	0.7~2.8	18.8	5.3	0.36	17.6	16.5
有机质土	2.8~10.7	18.7	4.4	0.43	21.2	10.0
粉质黏土	10.7~13.8	19	5.4	0.36	16.9	14.4
砂土	13.8~20	18.7	23.4	0.23	0	32.2
粉质黏土	20~34	19.6	7.0	0.25	17.3	16.3

2.2 单桩静载荷试验设计

本试验应用静压桩机作为自重反力平台,采用慢速荷载维持法作为加载形式<sup>[2]</sup>,试验过程依据规范中的相关规定,试验所用的静压管桩的相关参数如表 2 所示。

表 2 试验管桩参数

Table 2 The parameters of test pipe pile

桩号	外径/ mm	壁厚/ mm	桩长/ m	桩身混凝土 强度等级
试桩 1	500	100	16.8	C80

2.3 单桩静载荷试验模型的建立

数值模拟使用 ABAQUS 有限元软件,模

$$UF_k = \begin{cases} 0, & k=1; \\ \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{Var(d_k)}}, & 2 \leq k \leq n. \end{cases} \tag{7}$$

因此所求得的  $UF_k$  数据可以绘制一条  $UB - F_k$  曲线,对  $\{E'(i)\}$  的逆序列  $\{E'(i)\}$  也进行式(3)~式(7)的处理,形成两条相交于一点的曲线,由此荷载-广义应变能密度曲线的突变点可以确定。

2 有限元模型及合理性验证

2.1 试验概况

试验依托沈阳航空航天大学图书馆地基处理项目,设计以静压 PHC 管桩对地基进行加固<sup>[2]</sup>,勘测报告显示,试验场地除上层人工填土外,其下依次为粉土、有机质土、粉质黏土、砂土等,各层土体物理力学参数如表 1 所示。

型中土体采用摩尔-库伦模型,静压管桩采用混凝土塑性损伤模型,弹性模量取 38 GPa,密度为 2 300 kg/m<sup>3</sup>。土体模型尺寸取桩外径的 10 倍,长宽均为 5 m,高度取桩长的 2 倍,即 34 m。模拟分两步进行:①分析步采用静力通用分析步,用来计算施加重力后的地应力平衡;②分析步采用动力隐式分析步,使用非对称形式的矩阵存储方式。模型中各部件间的接触采用 ABAQUS 自识别方式,法向设置为硬接触,切向为罚摩擦并设置摩擦系数为 0.6。约束土体模型  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向上的位移,防止在向模型整体施加力时



导致土体侧向位移。桩与承台采用中性轴算法以六面体形式划分网格,属性采用C3D8R,土体使用四面体网格,属性为C3D10。笔者通过计算模型被划分5、10、15 mm大小的网格后,其计算时长为12 h,5 h,3 h。而计算得到的精确度为89%,86%,83%。故从精确度和计算时间的综合考虑下,笔者使用了10 mm网格划分的方式。考虑重力影响,对模型进行地应力平衡迭代计算,最终迭代结果小于0.1 μm,根据ABAQUS 帮助手册,结果可以被接受。

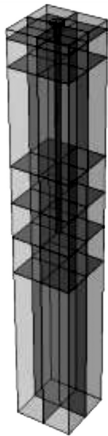


图1 单桩有限元模型

Fig.1 The finite element model of single pile

2.4 模型加载及合理性验算

模拟与试验的荷载-沉降曲线如图2所示。为验证两条曲线的近似程度,采用式(8)、式(9)来进行拟合度的验算。虽然模拟曲线与试验曲线并没有完全重合,但是其数值及曲线变化趋势是较为一致的,拟合程度达到了86%,证明本模拟较为接近试验情况,可以进行群桩基础的模拟。

$$t_i = 1 - \frac{S_a - S_r}{S_a} \times 100\% .$$

(8)

$$t = \frac{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}{n} .$$

(9)

式中: $S_r$ 和 $S_a$ 为某级荷载下实际和模拟桩的竖向沉降; $t_i$ 为每级荷载下两条曲线间的拟合度; $t$ 为两条曲线线性总拟合度。

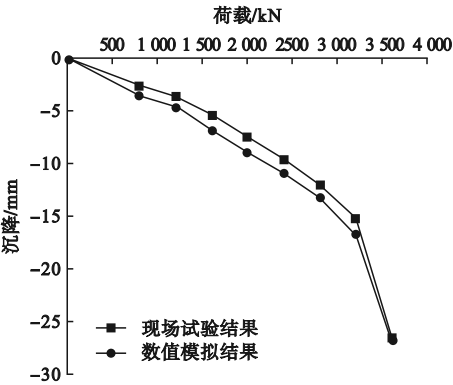


图2 单桩静荷载试验与模拟荷载-沉降曲线

Fig.2 The test and simulated load-settlement curves of single pile under static load

3 群桩基础的有限元模拟及承载力分析

3.1 群桩基础模型的建立

群桩基础由四根静压管桩与顶部承台结构组成<sup>[19-20]</sup>,桩体具体参数与单桩模拟一致,桩与桩之间的距离为2 250 mm,承台为边长为5 m的正方形,周围土体长宽均取20 m,高取34 m,各土层及模型参数与单桩模型完全相同,群桩模型如图3所示。

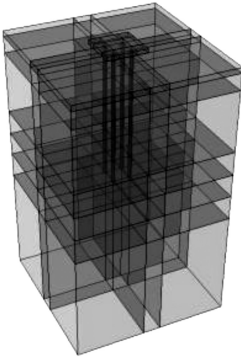


图3 群桩基础有限元模型

Fig.3 The finite element model of group pile foundation

3.2 群桩基础模型的受力分析

在静压管桩承受竖向力的作用时,桩周土体会由于摩擦力的作用随管桩发生位移,这一作用在进行单桩承载力模拟时发挥的效果并不明显,但是在群桩基础中,桩与桩之间

距离较近,桩周土的位移会发生叠加,直接影响群桩基础的承载力大小。文献[2]指出,桩间距为  $4.5 d$  时可以认为是一个临界值,大于这个范围群桩中的桩体受力状态接近于单桩,虽然不受到邻近桩体的影响,群桩效应可忽略不计,但是由于桩与桩之间的距离较大,单位面积内的群桩基础承载力反而减小。当桩间距小于  $4.5 d$  这个临界值时,将产生群桩效应,群桩基础的承载力并不会随着桩间距的缩小、桩数量的增加而发生增大,反而会导致承载力的降低。

重力荷载下的位移云图如图 4(a)所示,极限荷载下的位移云图如图 4(b)所示。对比图 4(a)、(b)可以发现,在群桩基础加压过程中,桩侧土体与桩底土体位移影响范围不断增大最终发生重叠,造成了邻近桩体间的相互影响,这就清楚地解释了群桩效应产生的原因。群桩基础承台底土体由于承台的压力作用向下发生变形,并随着荷载的增大变形逐渐增大,群桩范围内的桩与土体共同组成一个整体,提高了整体的承载能力,但这一范围内的桩体会同时受到来自邻近桩体与承台沉降所带来的双重应力叠加,造成承台底土的反力偏小,无法为承台正常提供承载能力<sup>[3]</sup>。所以,群桩承载力的大小不仅受到邻桩之间所造成的桩侧土体与桩端土体变形的影响,也受到桩顶承台所造成的土体变形影响。

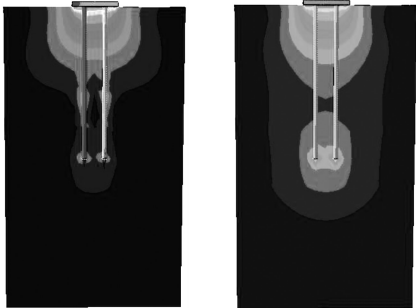


图 4 群桩基础的位移云图

Fig. 4 The displacement cloud maps of group pile foundation

提取模型中承台中心点处的竖直方向位移数据,绘制群桩基础的荷载 - 沉降曲线如图 5 所示。取沉降值为  $40 \text{ mm}$  时的荷载为极限荷载<sup>[2-3]</sup>,可以得到群桩基础模型的极限荷载值为  $3\,520 \text{ kN}$ ,将安全度系数设置为 2,对应的群桩基础设计值为  $1\,760 \text{ kN}$ 。分析其曲线特征发现,群桩基础的荷载 - 沉降曲线接近为一条直线,曲线中每一点之间的沉降值较为均匀,难以单独通过曲线判断出荷载为  $3\,520 \text{ kN}$  时群桩基础处于什么状态,是否发生破坏,而且在极限荷载之后很长一段区间曲线依旧保持原来的状态,并没有因为超过了极限荷载值而发生斜率上的改变,所以当出现这种情况时,通过添加一些新的判定方式去解决这类问题是必要的。

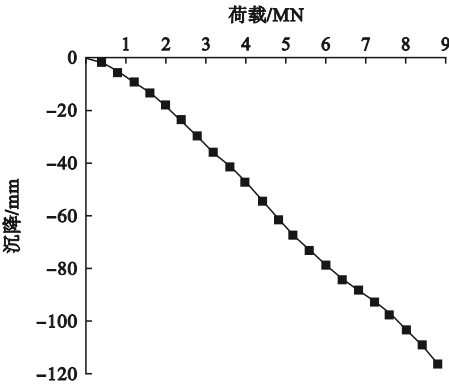


图 5 群桩基础荷载 - 沉降曲线

Fig. 5 The load-settlement curve of group pile foundation

为验证群桩模拟中桩土间相互作用力是否符合物理规律及所产生数据的准确性,改变群桩基础的桩间距做了以下几组模拟,分别取桩间距为  $3 d(1\,500 \text{ mm})$ 、 $4 d(2\,000 \text{ mm})$ 、 $5 d(2\,500 \text{ mm})$ 、 $6 d(3\,000 \text{ mm})$ ,并提取模型中的沉降数据,绘制出图 6 所示的荷载 - 沉降曲线。以上 4 种条件下的极限荷载值分别为  $3\,390 \text{ kN}$ 、 $3\,440 \text{ kN}$ 、 $3\,590 \text{ kN}$ 、 $3\,560 \text{ kN}$ ,所以在文中模拟条件下,桩间距为  $5 d$  可认为是一个极值,此时群桩基础的极限荷载达到最大值,群桩效应系数为 0.224,超出此范围的群桩极限承载力逐渐降低并趋于一个定值,

这与 Z. J. Zhou 等<sup>[21-22]</sup>得出的结论非常相似,证明群桩模拟具有一定准确性,并可真实反映桩土间的相互作用情况。

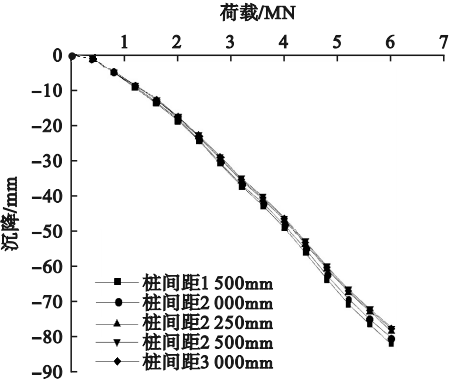


图6 改变桩间距条件下荷载-沉降曲线

Fig. 6 The load-settlement curves with different pile spacing

3.3 群桩基础的特征曲线分析

提取模型承台中心点的应变数据,将应变数据以式(1)、式(2)转化为广义应变能密度,归一化广义应变能密度绘制如图7所示

的荷载-归一化广义应变能密度曲线,使用 M-K 法进行判定,P 点及 Q 点分别为“弹塑性分支荷载”与“失效荷载”,两点的荷载值分别为 2 140 kN 与 4 290 kN,F 点与 S 点分别对应极限荷载为 3 520 kN 及设计荷载为 1 760 kN,图 8 为 S、P、Q、F 四点所对应的变形及等效塑性应变云图。

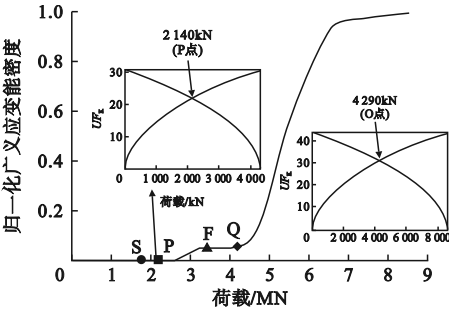
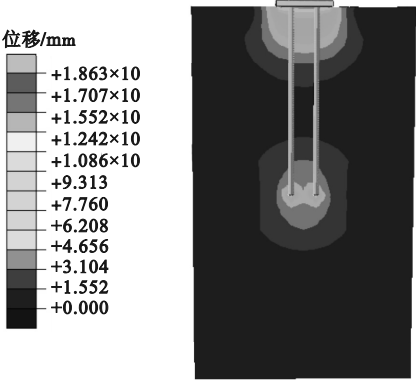
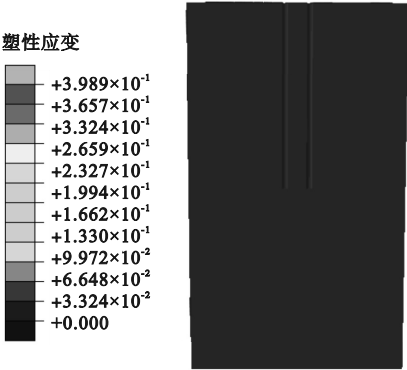


图7 群桩基础的荷载-归一化应变能密度曲线

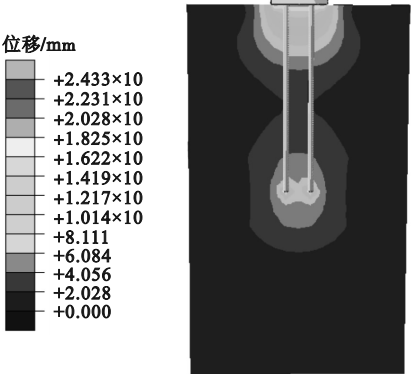
Fig. 7 The load-normalized strain energy density curve of group pile foundation



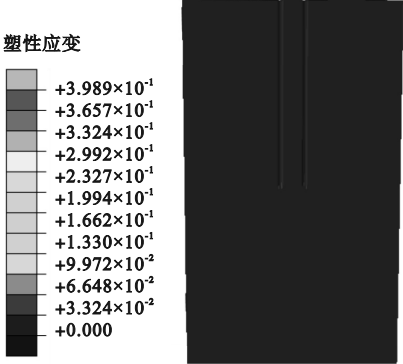
(a) 设计荷载变形云图



(b) 设计荷载等效塑性应变云图



(c) 弹塑性分支荷载变形云图



(d) 弹塑性分支荷载等效塑性应变云图

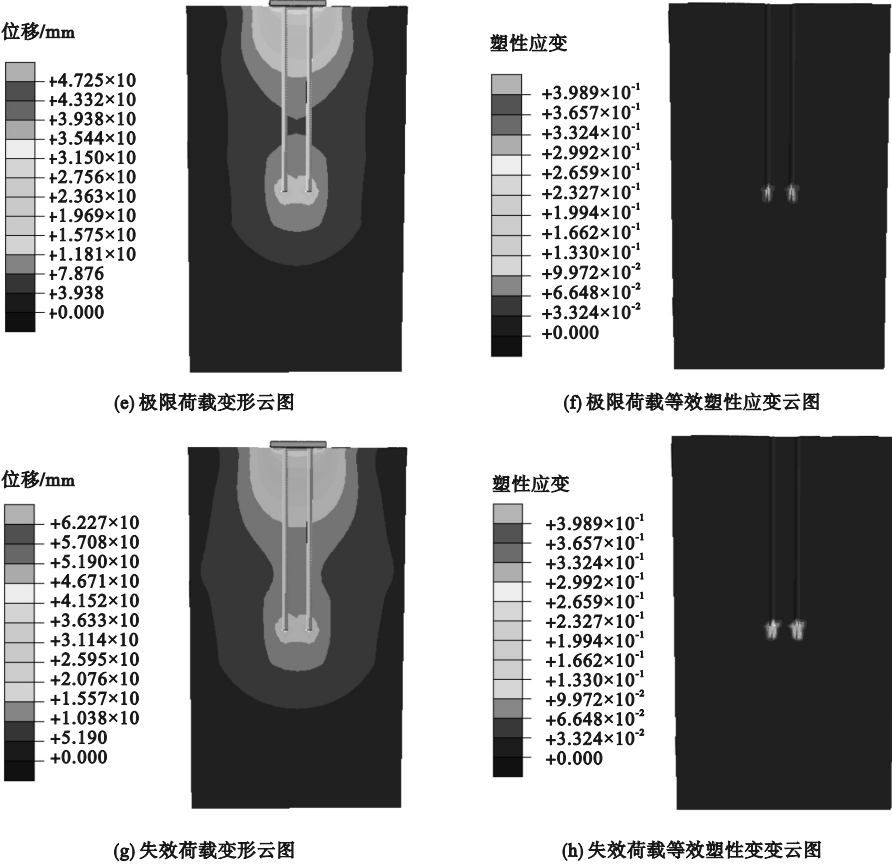


图 8 群桩基础在各级荷载下的位移及等效塑性应变云图

Fig. 8 The deformation and equivalent plastic strain clouds of group pile foundation under all levels of load

群桩基础的荷载 - 归一化广义应变能密度曲线与上文所得到的荷载 - 沉降曲线不同, 曲线具有明显的转折情况, 从开始加载至 P 点这一过程, 曲线斜率变化并不明显, 应变能密度没有显著的提高, 结构被认为处于弹性状态, 设计荷载 S 点正好位于此区间内, 如图 8 (a)、(b) 所示, 群桩基础位移为 13 mm, 承台下部土体位移影响范围与桩端土体影响范围没有发生重合, 说明群桩基础具有很大的承载力裕度, 在模型的等效塑性应变云图中并没有出现塑性变形, 此时结构稳定。

P 点被认为是结构的“弹塑性分支荷载”, 经过 P 点, 曲线中应变能密度开始出现变化, 曲线的斜率逐渐增大, 结构由原来的弹性阶段向弹塑性阶段转变, 变形及等效塑性应变云图如图 8 (c)、(d) 所示, 群桩基础承台下部土体位移影响范围与桩端土体位移影

响范围发生重合, 群桩整体进入工作状态, 桩端土体开始出现微量塑性应变。

从 P 点到 Q 点之间群桩被认为处于弹塑性阶段, 结构此时正处于塑性的累积, 应变能密度先出现幅度较小的增大情况, 然后逐渐趋于稳定, 这是群桩基础自适应的一个过程, 为了将结构调整至更好的受力状态。极限荷载 F 也正好位于此区间内, 如图 8 (e)、(f) 所示, F 点承台位移为 40 mm, 承台下部土体与桩端土体位移影响范围随着荷载的增加逐渐扩大, 桩端土体塑性区域及数值逐渐增大, 弹塑性阶段为大部分群桩基础在正常工作时的状态, 所以此时群桩基础整体受力状态没有发生太大的改变。

Q 点为结构的“失效荷载”, 在这点后荷载 - 归一化广义应变能密度曲线斜率增大, 转化为一条接近垂直的曲线, 群桩基础的受



力状态发生了改变,如图 8(g)、(h) 所示。群桩基础的位移为 52 mm,群桩影响范围向四周扩大,桩端塑性区域增大,应变数值增加,此时认为群桩基础开始进入失效状态,桩端土体虽然没有达到破坏所需要的条件,但受力情况已经转化为弹塑性阶段,且沉降数值已经达到了一个临界状态,虽然桩端土体可以继续受力,但群桩基础和其上建筑物可能会由于过大的沉降而造成损坏。

分析发现,弹塑性分支荷载比设计荷载高 21.6%,原设计荷载值较为保守,造成了承载力的浪费,出于提高荷载和节省材料的目的,建议将弹塑性分支荷载作为群桩基础的设计荷载,从弹塑性分支荷载至极限荷载这一区间结构可以正常使用,极限荷载至失效荷载这一区间拟作为群桩基础的安全裕度使用,一旦群桩的竖向受力超过 4 290 kN,应立即停止加载,避免结构由于桩端土体塑性的累积发生突然破坏。

为探究 S、P、Q、F 四点荷载值与位移增量之间的关系,将群桩基础的位移数据进行如式(10)所示的计算,计算每级荷载下的位移增量,得到如图 9 所示的荷载 - 位移增量曲线。

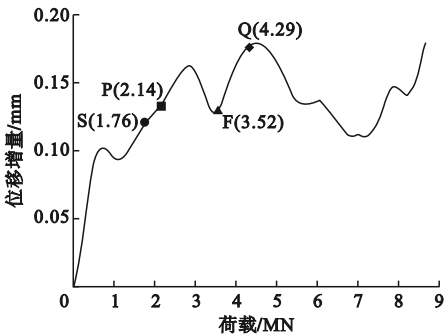


图 9 群桩基础的荷载 - 位移增量曲线

Fig. 9 The load-displacement increment curve of group pile foundation

由图 9 可知,极限荷载点 F 位于从 P 至 Q 这一变化过程的波谷,此时的位移增量最小,说明群桩基础在 F 点处相对稳定,不会出现位移的突然增大。Q 点位于曲线的波峰

位置,是曲线位移增量的最大值,群桩基础在此点后进入失效状态,无法继续承受荷载。

$$S = U_t - U_{t-1} \tag{10}$$

式中: $S$  为各级荷载下的位移增长; $U_t$  为第  $t$  级荷载下的位移; $U_{t-1}$  为第  $t - 1$  级荷载下的位移。

4 结 论

(1) 结构受力状态理论可以应用于群桩基础的承载力判定,将弹塑性分支荷载(P 点)作为群桩基础的设计荷载,失效荷载(Q 点)作为群桩基础加载终止条件。

(2) 弹塑性分支荷载与以控制沉降为 40 mm 方式得到的群桩基础设计荷载相比提高了 21.6%;由此可见,原设计值偏于保守,这样就造成了施工材料的浪费。群桩基础在设计过程中,可以将规范与结构受力状态理论相互验证,适当提高群桩承载力的设计值。

(3) 失效荷载比极限荷载大 770 kN,从极限荷载至失效荷载这一区间,经结构受力状态理论证明结构可以继续正常工作,可作为群桩基础的安全裕度使用,提高了地基基础的安全性。

参考文献

[ 1 ] 刘金砺. 竖向荷载下的群桩效应和群桩基础概念设计若干问题[J]. 土木工程学报, 2004 (1): 78 - 83.  
(LIU Jinli. Group pile effect under vertical load and some problems of conceptual design of group pile foundation [J]. China civil engineering journal, 2004 (1): 78 - 83.)  
[ 2 ] 赵俭斌, 王志斌, 史永强. 静压 PHC 管桩群桩效应的数值模拟分析[J]. 工程力学, 2014, 31 (增刊 1): 139 - 144.  
(ZHAO Jianbin, WANG Zhibin, SHI Yongqiang. Numerical simulation analysis of cluster pile effect of hydrostatic PHC pipe piles [J]. Engineering mechanics, 2014, 31 (S1): 139 - 144.)  
[ 3 ] 秋仁东, 刘金砺, 高文生, 等. 长群桩基础承载力性状的大比例尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (12): 2233 - 2242.  
(QIU Rendong, LIU Jinli, GAO Wensheng, et al. Experimental study on the bearing capacity properties of long group pile foundation with large scale model [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34

- (12):2233-2242.)
- [4] 周广春. 结构受力状态理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2020.  
(ZHOU Guangchun. Structural stressing state analysis and its applications [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press,2020.)
  - [5] ZHOU G,SHI J,LI P, et al. Characteristics of structural state of stress for steel frame in progressive collapse [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 160: 444-456.
  - [6] LIU B, ZHANG Y, LI R, et al. Essential stressing state features of spirally reinforced concrete short columns revealed by modeling experimental strain data [J]. Structures,2020, 25:1-7.
  - [7] ZHOU G C, SHI J, YU M H, et al. Strength without size effect and formula of strength for concrete and natural marble [J]. Materials, 2019,12(17):2685.
  - [8] ZHANG M Y, ZHANG P, SHAO Y S, et al. General working features of axially compressive members revealed by structural stressing state theory [J]. Case studies in construction materials,2022,17:e01292.
  - [9] SHI J, LI W T, ZHENG K K, et al. Experimental investigation into stressing state characteristics of large-curvature continuous steel box-girder bridge model [J]. Construction building materials,2018,178:574-583.
  - [10] 李震. 不锈钢管混凝土短柱和钢管混凝土拱受力状态及失效准则研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
(LI Zhen. Study on stress state and failure criterion of short stainless steel pipe concrete column and steel pipe concrete arch [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2017.)
  - [11] SHI Jun, LI Pengcheng, CHEN Weizhen, et al. Structural state of stress analysis of concrete - filled stainless steel tubular short columns [J]. Stahlbau,2018,87(6):600-610.
  - [12] 杨领先. 不锈钢砼-钢管组合构件受力状态分析与失效准则研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.  
(YANG Lingxian. Analysis of force state and failure criterion of stainless steel-concrete-pipe composite members [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2019.)
  - [13] 赵俭斌,王启,张延年,等. 中性盐侵蚀对球墨铸铁管法兰连接抗弯影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(6):990-996.  
(ZHAO Jianbin,WANG Qi,ZHANG Yannian,et al. Effect of neutral salt erosion on the bending resistance of ductile iron pipe flange connection [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2021,37(6):990-996.)
  - [14] ZHAO J B, WANG Q, GONG Y F, et al. Bending working law of corroded ductile iron pipe flangeconnections revealed by structural stressing state theory [J]. International journal of pressure vessels and piping, 2022, 199: 104717.
  - [15] ZHAO J B, WANG Q, GONG Y F, et al. Bending and tensile stressing state features of ductile iron pipe flange connections revealed from tested strain data [J]. International journal of pressure vessels and piping, 2022, 199:104756.
  - [16] ZHAO Y, LIU B, LI H M, et al. Hysteretic stressing state features of RCB shear walls revealed by structural stressing state theory [J]. Case studies in construction materials, 2021,15:e00674.
  - [17] 郑凯凯. 基于数值形函数方法的哑铃形拱模型受力状态分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.  
(ZHENG Kaikai. Force state analysis of dumbbell-shaped arch model based on numerical shape function method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2019.)
  - [18] 史俊. 基于结构受力状态分析理论的结构共性工作性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
(SHI Jun. Analysis of common work performance of structure based on structural force state analysis theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2018.)
  - [19] 王艳林. 砂土中群桩桩-土相互作用与竖向承载力特性研究[D]. 郑州:河南工业大学,2021.  
(WANG Yanlin. Study on pile-soil interaction and vertical bearing capacity characteristics of group piles in sandy soils [D]. Zhengzhou: He'nan University of Technology,2021.)
  - [20] 马文杰,王旭,蒋代军,等. 桩间距对群桩承载性能影响的室内模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(增刊2):548-553.  
(MA Wenjie, WANG Xu, JIANG Daijun, et al. Indoor model experimental study on the effect of pile spacing on the bearing performance of group piles [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018,14(S2):548-553.)
  - [21] ZHOU Z J, WANG K C, FENG H M, et al. Centrifugal model test of post-grouting pile group in loess area [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2021,151:106985. 1-106985. 13.
  - [22] ZHOU L X, BARBATO M, YE A J. Experimental investigation of postearthquake vertical load-carrying capacity of scoured reinforced concrete pile group bridge foundations [J]. Journal of bridge engineering, 2021,26(12):4021091. 1-4021091. 14.  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)