

离散元法刚性桩复合地基承载机理研究

鲍 鹏^{1,2}, 张 惠¹, 姜忻良²

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475001; 2. 天津大学 建工学院, 天津 300072)

摘要:采用可变形体模型的离散元方法,对刚性桩复合地基的竖向承载能力以及桩土共同作用过程中桩、土承担荷载比例的变化规律进行了计算分析.揭示了刚性桩复合地基桩土共同作用的承载机理,提出了合理确定刚性桩复合地基承载力的方法.

关键词:刚性桩复合地基;承载机理;离散元法

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2005)01-0105-05

引言

复合地基技术是近年来发展起来的一种较新的地基处理方法^[1].其实质是天然地基的部分土体被置换或在土体内设置的加筋材料,从而使其得到增强形成加固区,复合地基形成后是由基体和增强体两部分组成的,并由这两部分共同承担上部结构通过基础传来的荷载.根据增强体的材料强度或刚度不同,复合地基可分为散体材料复合地基、柔性桩复合地基和刚性桩复合地基.刚性桩复合地基能在较大程度上利用土的承载力(包括承受水平荷载和竖向荷载的能力),同桩基相比^[2],桩数可有所减少,桩体一般不需要配筋,故用料省,施工简便,较桩基经济得多.同散体材料桩、柔性桩复合地基相比^[3],由于刚性桩复合地基中的桩体具有很大的刚度,可将荷载向更深的土层转布,故能较大幅度提高地基的承载力.因此刚性桩复合地基目前正得到越来越广泛的应用^[4].但是,同其他许多基础工程技术一样,刚性复合地基技术也是理论落后于实践.

离散元法突破了有限元法连续性假定,可以分析变形连续和不连续的多个物体相互作用问题以及大变形问题.同时能处理范围广泛的材料本构关系、相互作用准则和任意的几何形状^[5].本文利用可变形体模型的离散元法对刚性复合地基单桩非线性工作性状以及桩土共同工作过程中桩、土各自承担荷载比例的变化规律进行了分析研究.这对刚性复合地基承载力的确定、沉降计算以及施工质量检验具有一定的理论指导意义.

1 离散元方法

1.1 离散元法基本概念

离散单元法和有限元一样,是将所研究的区域划分成一个个分立的多边形块体单元,但是,单元因受不连续面控制,在以后的运动过程中,单元结点可以分离,即一个单元与其邻近单元可以接触,也可以分开.单元之间相互作用的力可以根据力和位移的关系求出.而每个单元的运动则完全根据该单元所受的不平衡力和不平衡力矩的大小按牛顿运动定律确定,因而可以采用动

收稿日期:2004-06-29

基金项目:河南省青年骨干教师资助计划项目(G2002025)

作者简介:鲍 鹏(1964),男,副教授,天津大学博士研究生,主要研究方为土木工程、结构力学.

态松弛法或静态松弛法进行求解. 最终, 块体单元可能达到平衡状态, 也可能一直运动下去.

离散单元法的单元, 从性质上分, 可以是刚性的, 也可以是非刚性的; 从几何形状上分, 可在任意多边形, 也可以是圆形. 单元之间可以看成是角-角接触, 角-边接触或边-边接触, 而且随着单元的平移和转动, 允许调整各个单元之间的接触关系. 对于岩土工程中的许多问题, 可以将刚性桩、承压板以及混凝土地下结构视为刚性离散单元, 土体视为可变形的离散单元, 而单元之间可采用弹塑性无拉力边-边接触模型^[6].

1.2 弹塑性无拉力边-边接触模型

如果两个离散单元的边界相应“叠合”则有两个角点与界面接触, 可用界面两端的作用力来代替该界面上的力. 由于接触边作用的是应力, 确定应力在接触边的分布情况, 最为简便的方法是把该应力近似地表示成两个均匀分布的应力, 见图 1.

引入刚度系数 k_n 和 k_s , 于是法向应力和切向应力为

$$\left. \begin{aligned} n &= k_n u_n \\ s &= -k_s u_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

考虑接触点的阻尼力, 并假定阻尼力与位移增量成正比, 则有:

$$\left. \begin{aligned} d_n &= -k_n u_n \\ d_s &= -k_s u_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, k_n 是块体的刚度阻尼比例系数.

根据不抗拉条件, 若 $n < 0$, 则令 $n = 0, d_n = 0; s = 0, d_s = 0$.

若切向应力超过摩擦力, 即 $|s| > c + \mu n$, 则令: $s = c + \mu n, d_s = 0$.

式中, μ 为摩擦系数, $\mu = \tan \phi$; c 为粘聚力系数. 后一等式成立是因为摩擦滑动本身就在消耗块体的动能, 因此无需再加阻尼力.

由以上可得 L_1 部分的接触力

$$\left. \begin{aligned} F_{n1} &= (n_1 + d_{n1}) L_1 \\ F_{s1} &= (s_1 + d_{s1}) L_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, F_{n1} 是法向接触力, F_{s1} 是切向接触力. L_1 由下式计算

$$L_1 = u_n^1 L / (u_n^1 + u_n^2) \quad (4)$$

式中, L 是接触总长度.

同理, 可得 L_2 部分的接触力.

1.3 可变形块体单元模型

根据变形体动力学原理和模态分解法以及弹性本构关系, 建立了新的适用于可变形块体的单元模型. 假设单元应变方程可写成与刚体模态无关的形式

$$m^k (\ddot{u}^k) = \frac{k}{A} - \frac{k}{I} \quad (5)$$

式中: m^k 为相对于应变模态 k 的单元广义(有效)质量; \ddot{u}^k 为应变模态 k 的内应变率;

$\frac{k}{A}$ 为相对于应变模态的单元施加应力; $\frac{k}{I}$ 为相对于应变模态的单元内应力.

单元的变形可以表达成刚体运动与应变的迭加, 从而单元内任一点的位移可写成:

$$u_i = \bar{u}_i + \sum_{ij} \bar{X}_j + \sum_{ij} \bar{X}_j \quad (6)$$

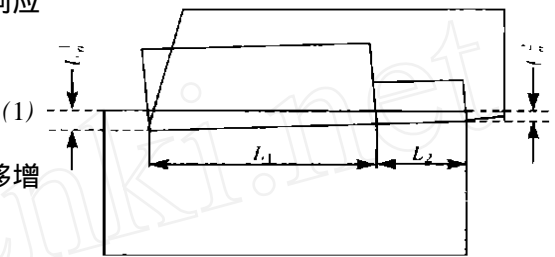


图 1 边-边接触模型

式中: u_i 为单元内任一点的位移; \bar{u}_i 为质心沿 i 方向的位移; \bar{x}_j 为单元内任一点相对于质心的坐标; ${}_{ij}$ 为转动张量, 定义为 ${}_{ij} = e_{ijk} k$, 其中 e_{ijk} 是置换张量, k 是转动矢量; ${}_{ij}$ 为应变张量.

在一个封闭体积内平均应力 $\bar{\sigma}_{ij}$, 可由施加于该体积边界上的集中力根据高斯公式求得. 也就是说, 施加应力 $\bar{\sigma}_{ij}$ 完全可以由作用在块体周边上的接触力表示, 即

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sum F_i^c X_j^c / V, \quad (7)$$

式中, \sum 表示对所有接触点求和; V 为块体的体积 (对于二维问题是面积 S); F_i^c 为作用于接触点 C 的集中力, X_j^c 为接触点 C 相对于块体形心的坐标.

由弹性关系, 块体单元的内应力为

$$\sigma_{ij}^I = 2G \epsilon_{ij} + \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij}, \quad (8)$$

$$O_{ij}^I = [2G \epsilon_{ij} + \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij}] t. \quad (9)$$

式中: σ_{ij}^I 为单元内应力张量; ϵ_{ij} 单元应变张量; ϵ_{kk} 为单元主应变张量; G 为材料剪切模量; λ 为拉梅常数, $\lambda = E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$; δ_{ij} 为 Kroneker delta 函数.

1.4 离散单元控制方程的差分格式及计算循环

考虑到块体的质量阻尼, 任一块体的离散单元法运动方程可以写成

$$\left. \begin{aligned} ma_x + mv_x &= F_x \\ ma_y + mv_y &= F_y \\ I + I &= M \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

式中: m 是单元的质量; v 为块体的质量阻尼比例系数; I 为块体转动惯量; F_x 、 F_y 为作用于块体上所有接触力合力的分量; M 为合力矩.

对式 (10) 进行一阶中心差分可以求出 $t + \Delta t/2$ 时刻的速度分量和角速度

$$\left. \begin{aligned} v_x(t + \Delta t/2) &= [v_x(t - \Delta t/2)(1 - a \Delta t/2) + F_x \Delta t/m] / (1 + a \Delta t/2) \\ v_y(t + \Delta t/2) &= [v_y(t - \Delta t/2)(1 - a \Delta t/2) + F_y \Delta t/m] / (1 + a \Delta t/2) \\ (t + \Delta t/2) &= [(t - \Delta t/2)(1 - a \Delta t/2) + M \Delta t/I] / (1 + a \Delta t/2) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

进而 $u_x(t + \Delta t)$ 、 $u_y(t + \Delta t)$ 、 $\theta(t + \Delta t)$ 可得.

离散元法求解的循环交错特性可以归纳如下, 如果根据边界条件已知位移 $u(t)$, 则按照上述的公式不难求出力 $F(t)$, 然后可确定 $a(t)$ 加上上一轮已知的 $v(t - \Delta t/2)$, 进而可得 $v(t + \Delta t/2)$, 对其积分后得 $u(t + \Delta t)$. 如此循环往复, 直到位移和力收敛, 达到平衡状态, 或者达到某一循环数为止.

2 计算模型与参数选择

根据以上原理, 用 FORTRAN 语言编制了相应的计算程序, 对竖向荷载作用下刚性桩复合地基的承载能力进行了分析计算. 计算模型如图 2 所示, 计算区域 3.4 m × 6 m, 边界为固定支承, 微型刚性桩桩径 200 mm, 桩长 4 m, 承压板宽 1 m. 桩体、承压板取为刚性离散单元, 重度 = 25 kN/m³. 土体取为可变形离散单元, 土体材料参数: 弹性模量 $E = 1 \times 10^8$ N/m², 泊松比 = 0.3, 摩擦系数 $\mu = 0.3$, 粘聚力系数 $c = 15$ kPa, 重度 = 18 kN/m³. 离散元计算参数^[7]: $k_n = 2.0 \times 10^8$ N/m², $k_s = 7.5 \times 10^7$ N/m², $\gamma = 1.0 \times 10^2$, $\beta = 3.0 \times 10^{-5}$, $t = 5.0 \times 10^{-3}$ s.

3 计算结果与分析

经计算,给出了刚性桩复合地基的 $Q - s$ 曲线和桩

土荷载分担比例曲线(见图 3、4). 从中可看出:

1) 桩顶反力和土反力随着总荷载的增大而增大,而且随着总荷载的不断增大,桩顶反力的增加幅度在增长,土总反力的增加幅度逐渐减小并趋于平稳.

2) 加荷初期,总荷载是由桩土共同承担的,土的分担荷载 - 沉降关系曲线基本呈直线;加荷到 120 kN 时,土的分担荷载 - 沉降关系曲线斜率减小,类似于材料屈服,此时桩的分担荷载 - 沉降关系曲线斜率开始增大;继续加荷至 300 kN 时,土的分担荷载 - 沉降曲线及总荷载 - 沉降曲线均很陡,且斜率很小. 对于土来说,其曲线基本呈缓变. 因此,相对于桩顶反力,土反力对沉降的敏感程度很低.

3) 加荷初期,土体发挥较大的作用,随着荷载的增加,土总反力的增加呈下降趋势,荷载逐渐由土转移到桩上,变为主要由桩承担荷载. 整个加载过程体现出桩、土共同承担荷载的规律.

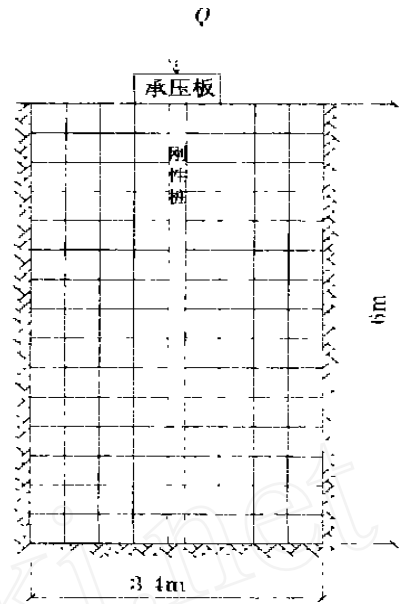


图 2 离散元计算模型

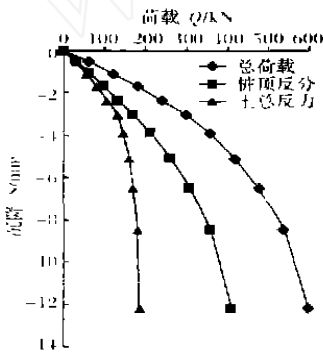


图 3 荷载 - 沉降曲线

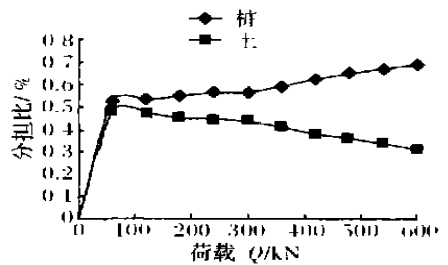


图 4 荷载分担比例曲线

4 结语

刚性桩复合地基与传统柔性复合地基相比,其承载力性状及破坏机理均发生了显著变化. 由于桩身强度有足够的保证,桩端又没有进入坚硬持力层,复合地基承载力不再是因桩身破坏或桩身压缩量过大而达到极限状态,而是刚性桩与桩间土共同承担荷载. 这使得复合地基承载力大幅度提高.

当套用天然地基和柔性桩复合地基的方法按沉降比 s/b 确定刚性桩复合地基承载力时,根据上述分析,由于桩顶反力对沉降的变化较为敏感,因此, s/b 取值不同对承载力的影响很

大.而且,桩土荷载分担比不仅取决于 s/b ,承压板尺寸、桩距都对其有影响.即使在同一相对沉降标准下,桩顶反力也是不确定的,因而造成复合地基中桩的安全度不确定.

综上所述,在进行荷载试验时,若不加载至承载力极限状态,仅按相对变形值确定的复合地基承载力标准值,其安全度不明确.因此,宜进行单桩承载力荷载试验,确定单桩极限承载力,进而得到单桩承载力特征值.在当地大量资料分析与研究基础上,根据不同地区或场地的具体特点规定桩间土的承担比例,最终确定刚性桩复合地基的承载能力.

参考文献:

- [1] 郑俊杰,彭小荣. 桩土共同作用设计理论研究[J]. 岩土力学. 2003, 24(2):242-245.
- [2] JG94-94, 建筑桩基技术规范[S].
- [3] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [4] 郑刚,纪颖波,吴永红. 不同分担比对疏桩基础沉降计算的影响[A]. 21世纪高层建筑基础工程[C],北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [5] 雷晓燕. 岩土工程数值计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [6] 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳:东北工学院出版社,1991.
- [7] 李华,孔宪立. 离散单元法:参数选择与讨论[A]. 第一届计算岩土力学研讨会论文集[C]沈阳:东北工学院出版社,1987.

Study on the Bearing Mechanism of Rigid Pile Composite Ground with Discrete Element Method

BAO Peng^{1,2}, ZHANG Hui¹, JIANG Xin-liang²

(School of Civil Engineering, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, the bearing capacity of rigid pile composite ground under vertical loads and the law of variation of pile-soil bearing ratio among pile-soil interaction are calculated and analyzed on the basis of discrete element method of the deformable body model, which describes the bearing mechanism of pile-soil interaction of rigid pile composite ground. The method of how to ascertain the bearing capacity of rigid pile composite ground is presented.

Key words: rigid pile composite ground; bearing mechanism; discrete element method