

# 刚性桩复合地基的设计及承载力评价

张明 温立新 赵正军

(中航勘察设计研究院,北京 100086)

**【摘要】** 目前国内对刚性桩复合地基的理解不一。由于刚性桩复合地基的作用机理和桩基础类似,因而有人认为它不是复合地基而是桩基础。在明确与桩基础的区别后,详细分析、介绍了刚性桩复合地基设计思想、步骤及其承载力评价。

**【关键词】** 刚性桩复合地基;柔性桩复合地基;桩基础;素混凝土桩;砂石桩;褥垫层

**【中图分类号】** TU472

**【Abstract】** At present people have various views on the composite ground of rigid piles in our country. Because the function mechanism of the composite ground of rigid piles is similar with the pile foundation, some people regard it as a kind of pile foundation. After clearly determinating its difference from pile foundation, the train of thought and steps of design of composite ground of rigid piles as well as its bearing capacity assessment are analyzed and introduced in detail.

**【Key words】** composite ground of rigid pile; composite ground of soften pile; pile foundation; concrete pile; sand-stone pile; cushion

## 0 引言

近年来复合地基技术发展迅速,在以砂石桩为代表的柔性桩复合地基日渐成熟的情况下,以素混凝土桩为代表的刚性桩复合地基的应用也有逐渐推广之势。由于刚性桩复合地基的作用机理和桩基础类似,因而有人认为它不是复合地基而是桩基础。

规范规定高层建筑中的箱基必须有一定的埋深,以抵抗外部水平力对建筑物的倾覆作用。采用桩箱基础时,桩基础本身具有一定的抗水平力能力,通过相关的验算,就可以突破规范的限制。此时桩基础就起了加深基础的作用。在一些采用高承台桩基础的建筑物或桥梁工程中,桩基础的“基础”作用就体现的比较充分了。因此说桩基础是一种“深基础”,而复合地基是一种“地基”,基本没有

抗倾覆的能力。以此来区分桩基础和复合地基就比较直观了,也较容易理解。

刚性桩复合地基至少是地基的一种。但在承受上部结构竖向荷载及基础自重时,刚性桩复合地基与复合桩基在作用机理、变形性状,单桩受力状态及设计思想等方面都比较类同;与传统的以柔性桩为代表的复合地基作用机理和设计思想反而差别较大。

## 1 刚性桩复合地基的设计思想

由于刚性桩复合地基和复合桩基础作用机理比较类同,笔者认为现行《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)的有关设计原则可供刚性桩复合地基设计时参考。比如以极限状态为原则,按“设计值”进行设计。

在准确分析工程特征、工程地质资料及选定桩型的前提下,须选定一个相对坚硬土

**作者简介:**张明,1972年生,男,汉族,山西河曲县人。1994年毕业于合肥工业大学,获岩土工程学士学位。现主要从事岩土工程勘察、设计及施工作业。

层,作为刚性桩的端层。并且必须进入一定深度,以保证端承力的发挥和必要的侧向约束。应避免将桩端置于软土层上。此外还必须计算桩长、桩间距,单桩承载力极限值、设计值,验算桩身结构强度,验算群桩整体破坏的可能性。

对于刚性桩复合地基来说,由于桩土应力比较大,须在桩顶以上铺设 100 mm~300 mm 厚的砂石褥垫层,以调整桩土应力比,增大基底摩擦。褥垫层的厚度可以根据建筑物的结构特征、基础形式、桩间土性质及其对地基变形的要求等因素综合选定。

## 2 刚性桩复合地基的设计步骤

### 2.1 计算桩长

在准确分析各方面资料之后,选定一种比较适宜的桩型,并确定某一相对硬层为桩端层。桩端进入硬层深度一般不低于 1.5  $d$  ( $d$  为桩径)。

### 2.2 计算单桩竖向极限承载力值及设计值

采用当地经验值或根据施工工艺,参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)提供的有关数据,按式(1)计算单桩竖向极限承载力值  $Q_u$

$$Q_u = \mu \sum q_{si} l_i + q_p A_p \quad (1)$$

式中:  $A_p$ ——桩身截面积,  $m^2$ ;

$\mu$ ——桩身周长,  $m$ ;

$l_i$ ——桩在第  $i$  层土中的长度,  $m$ ;

$q_{si}$ ——桩侧第  $i$  层土的极限侧阻力值,  $kPa$ ;

$q_p$ ——极限端阻力值,  $kPa$ 。

单桩承载力设计值,按式(2)计算确定:

$$R = Q_u / 1.65 \quad (2)$$

### 2.3 计算桩土面积置换率

将单桩承载力设计值代入式(3),计算出桩土面积置换率  $m$

$$f_{sp} = mR/A_p + \beta(1-m)f_s \quad (3)$$

式中:  $f_{sp}$ ——刚性桩复合地基承载力设计值,  $kPa$ ;

$f_s$ ——桩间土承载力设计值,  $kPa$ 。可根据《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)中的第 5.1.4 条计算确定或按第 5.1.3 条作深宽修正后确定;

$\beta$ ——桩间土承载力折减系数,一般取 0.7~1.0;对变形要求高的建筑物取低值。

通过原位载荷试验获得刚性桩复合地基承载力极限值  $Q_{sp}$  时,可按式(4)确定刚性桩复合地基承载力设计值:

$$f_{sp} = Q_{sp} / 1.65 \quad (4)$$

### 2.4 计算桩间距

根据桩土面积置换率计算桩中心距  $s$ 。

对于等边三角形布桩,桩中心距按式(5)计算:

$$s = 1.075 \sqrt{\frac{A_p}{m}} \quad (5)$$

对于正方形布桩桩中心距按式(6)计算:

$$s = \sqrt{\frac{A_p}{m}} \quad (6)$$

对于矩形布桩,桩的横间距  $s_1$  和纵间距  $s_2$  按式(7)计算:

$$s_1 \times s_2 = A_p / m \quad (7)$$

桩中心距一般还必须满足大于或等于 3  $d$  的要求。

### 2.5 确定桩身强度

对于桩身材料为混凝土的,可将单桩极限承载力值代入式(8)、式(9)计算混凝土强度设计值:

$$Q_u / A_p \leq f_{cc} \quad (8)$$

$$f_{cc} = 0.95 f_c \quad (9)$$

式中:  $f_{cc}$ ——素混凝土轴心抗压强度设计值,  $MPa$ ;

$f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值,  $MPa$ 。

据混凝土强度设计值可查表确定混凝土强度等级。

对于采用其它桩身材料的,可参照上式计算桩身强度。

## 2.6 群桩基础整体破坏验算

将群桩基础等代为整体墩基础,则上部结构的荷载通过群桩外边缘以内的整体墩基础向下传递给桩端层。

对于桩进入砂卵石层的群桩,验算时可直接按式(10)验算,不用考虑  $\varphi/4$  角的影响。

$$(N + G + G_{sp}) - f_t \leq (f + f_w) \times A \quad (10)$$

式中: $N$  ——上部结构荷载设计值,kN;

$G$  ——基础自重,kN;

$G_{sp}$  ——桩土自重,kN;

$f_t$  ——假想实体墩基础桩周土的摩擦力标准值,kN;

$f$  ——桩端土层地基承载力设计值,kPa;

$f_w$  ——水对实心基础的浮力,kPa;

$A$  ——假想实体墩基础底面积, $m^2$ 。

如满足式(10),说明桩端层强度足够,群桩基础不会发生整体破坏。

对于桩端未进入砂卵石层的群桩,还应考虑  $\varphi/4$  角的影响。读者可参照上式验算。

## 2.7 软弱下卧层验算

如果桩端层以下存在软弱下卧层,可按式(11)验算其强度能否满足设计要求。

$$p_z + p_{\alpha} + p_{pz} \leq f \quad (11)$$

式中: $p_z$  ——软弱下卧层顶面处的附加压力设计值,kPa;

$p_{\alpha}$  ——软弱下卧层顶面处土的自重,kPa;

$p_{pz}$  ——软弱下卧层顶面处的桩身自重,kPa;

$f$  ——软弱下卧层地基承载力设计值,kPa。

## 3 刚性桩复合地基的评价

刚性桩复合地基的检测,一种方法是分

别对桩、土进行测试。有经验的地区,可取适当数量的土样进行室内物理力学性质的试验,其它情况对桩间土进行静载荷试验,以确定桩间土的承载力设计值  $f_s$ ;对单桩必须进行静载荷试验,同一场地一般不宜少于三个试验点。然后按照式(2)计算单桩承载力设计值  $R$ 。而后将  $R$ 、 $f_s$  一同代入式(3),计算出每个试验点的刚性桩复合地基承载力设计值。

另一种方法是采用单桩刚性桩复合地基试验,同一场地一般不宜少于三个试验点。而后按照式(4)计算出每个试验点的刚性桩复合地基承载力设计值。

对以上两种方法所得的结果,如果三个试验点的刚性桩复合地基承载力设计值的极差不大于 30%,则取三者的算术平均值作为整个刚性桩复合地基承载力设计值。否则,应分析原因,并采取相应的措施。

此外,为检测单桩结构的完整性,可根据实际情况抽取 2%~5% 的单桩进行低应变动力测试。通过与单桩静载荷试验资料进行对比分析,可综合评价整个刚性桩复合地基施工质量的优劣。

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

北京某机房楼主楼 20 层,总高度 105 m,剪力墙结构,室内地坪标高 39.10 m,箱形基础(平面尺寸为 68.5 m×32.5 m),基底标高为 26.83 m,基坑深度为地表下约 10.7 m,设计要求地基承载力设计值 550 kPa。

地基持力层为粉质粘土( $f_k = 180$  kPa);基底下主要是第四纪沉积的粉土及粘性土( $f_k \geq 180$  kPa);在标高 10.63 m(基底下 16.2 m)处有一层厚度在 3 m 左右的中粗砂层。地下水位为地表下 2.0 m。

主楼与裙房(行政楼,3 层)地下有通信电缆等通过,为防止两楼间发生不均匀沉降导致橡胶止水带撕裂,必须严格控制主楼的地基沉降。原设计采用空心预应力管桩基

础,后因试验失败改成刚性桩复合地基,采用长螺旋钻孔压灌素混凝土刚性桩复合地基。

#### 4.2 刚性桩复合地基设计

针对尽可能减少主楼的地基沉降这一目的,选用 $\phi 600$ 的桩,以基底下17.1 m的中粗砂层为桩端层,并要求进入0.9 m,设计桩长17.0 m。桩顶以上铺设100 mm厚的级配砂石。

计算得单桩承载力极限值 $Q_u = 2\ 000$  kN,设计值 $R = 1\ 200$  kN,桩间土承载力设计值 $f_{sp} = 318$  kPa,桩间土承载力折减系数 $\beta$ 取0.7,计算得桩土面积置换率 $m = 0.081$ ,正方形布桩,计算桩中心距为1.87 m。

结合基础形式,实际采用矩形布桩,桩中心距为1.850 m $\times$ 1.825 m,桩土面积置换率为0.084。整个工程共布桩684根。

#### 4.3 刚性桩复合地基评价

该刚性桩复合地基从1997年3月20日开始施工,同年4月24日竣工。竣工后分别采用静力载荷试验、低应变动力测试、钻取素

混凝土芯样等多种方法对该刚性桩复合地基进行了全面检测。检测结果表明,该刚性桩复合地基承载力设计值 $f = 592.7$  kPa,满足设计要求。

截至1999年4月20日,该建筑物结构封顶已8个月。根据沉降观测资料,此时该建筑物刚性桩复合地基最大沉降39.93 mm,最大倾斜值 $1.7 \times 10^{-4}$ ,均满足设计要求。

#### 5 结 语

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—91)没有涉及刚性桩复合地基,但它的运用却越来越广泛。岩土工程师们对它的理解也众说纷纭,莫衷一是。笔者根据对有关规范的理解及工程实践,对刚性桩复合地基从设计思想、设计步骤及承载力评价进行了初步探讨,但仍需从理论上不断完善,并作进一步总结和研究。

收稿日期:1999-09-10

(上接6页)

岩体结构、地应力等因素密切相关,这就要求我们应该清楚地了解岩体工程现场的岩体工程特性,这往往是进行有效计算的第一步。

另一方面,计算方法的成功应用还有待于寻求更加适宜于岩体工程特性的数值计算模型。如何简单而又有效地刻画岩体结构往往是有限元计算应用于工程的关键。从岩体结构细观性质入手,基于对细观结构和细观本构关系的认识,将随机分析等理论方法与计算力学相结合来预测材料的宏观性质,然后应用于岩体工程的计算是岩体计算力学的一个重要发展趋势<sup>[8]</sup>。

#### 参 考 文 献

- 1 于学馥. 信息时代岩土力学与采矿计算初步. 北京:科学出版社,1991

- 2 刘怀恒. 岩石力学平面非线性有限元法及程序. 地下工程,1979(11):21~27
- 3 王书宣,王坤儒. 大断面地下工程的开挖方法. 地下工程,1984(6):10~14
- 4 朱维申,何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学. 北京:科学出版社,1996
- 5 朱浮声. 锚喷加固设计方法. 北京:冶金工业出版社,1993
- 6 高允彦. 正交及回归试验设计方法. 北京:冶金工业出版社,1988
- 7 朱万成等. 正交有限元方法及其喷锚参数优化中的应用. 金属矿山,1998(3):4~6
- 8 周维垣,杨若琼. 岩石力学数学模拟的现状与发展. 岩石力学与工程学报. 1998,1(17)(增):937~939

收稿日期:1999-09-03