

文章编号:1007-2993(2002)03-0167-04

刚性桩复合地基应用中几个问题的探讨

秦 峰 姬深堂 胡向奎

(中煤国际工程集团北京华宇工程有限公司,河南平顶山 467002)

【摘 要】 对刚性桩复合地基在湿陷性黄土地基中的应用、褥垫层的设置原则及有边载条件下的复合地基承载力的修正等问题进行了探讨。

【关键词】 刚性桩复合地基;湿陷性黄土;褥垫层;边荷载;承载力修正

【中图分类号】 TU472

Some Discussion on Composite Ground with Rigid Pile

【Abstract】 Some problems about composite foundation with rigid piles are discussed, Such as its application in subsidence loess foundation, the principle of cushion setting and the composite ground bearing capacity amend.

【Key Words】 composite foundation of rigid piles; subsidence loess; cushion; boundary load; bearing capacity amend

0 引 言

近年来,在砂石桩、水泥土类桩等柔性桩复合地基的理论与实践逐渐成熟的情况下,刚性桩复合地基技术也日益得到广泛的推广。刚性桩主要包括 CFG 桩、桩类桩等高粘结强度桩,其特点在于“刚”,相对于柔性桩具更强的桩体强度,不仅可全桩长发挥桩的侧阻,桩端落在好土层上也能很好地发挥端阻作用。由于刚性桩复合地基与其它类型复合地基相比,具有地基承载力提高幅度大且可调性强、变形模量高、桩体质量及耐久性有保证等优点,在全国得到广泛应用,积累了丰富的设计、施工经验。

1 刚性桩复合地基应用于黄土地基

目前湿陷性黄土地基处理常采用灰土垫层法、灰土挤密桩法,其强度、变形等,大多难以满足高重建建筑物地基的要求,设计上不得不采用桩基础,而桩基又存在施工工期长、工程费用高的缺点,常大幅度地增加工程造价。

振动沉管法施工的灰土挤密桩的原理是利用桩管的振动和侧向挤压挤密桩间土,从而起到消除桩间土湿陷性,提高其承载力的目的。由于刚性桩一般也采用振动式沉管桩机施工,与灰土挤密桩使用的施工设备相同,故可考虑用于湿陷性黄土地基,达到既消除湿陷性,又提高承载力、减少变形量的目的。

在湿陷性黄土地区,刚性桩设计可参考灰土挤密桩消除地基土湿陷性的设计方法进行,其设计原则应为在消除地基湿陷性的基础上大幅度提高承载力。

1.1 桩径

根据沉管桩机的不同,刚性桩桩径一般设计成350 mm、400 mm和450 mm。黄土地区可根据当地施工经验及成孔机械规格进行选用,以达到最佳挤密效果为宜。

1.2 桩距

为保证桩周土体的挤密均匀,桩孔孔位宜按正三角形布置,黄土地基刚性桩桩距应按挤

作者简介:秦 峰,1970年生,男,汉族,河南孟州市人,工程师。1995年毕业于长春地质学院,学士学位。现主要从事岩土工程勘察、设计、施工和研究工作。

密消除桩间土湿陷性进行控制,不宜按承载力计算。依据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-90)的规定,桩距按下式进行计算:

$$x = \sqrt{\frac{0.907 \bar{\eta}_c \rho_{dmax}}{\bar{\eta}_c \rho_{dmax} - \rho_d}} d \quad (1)$$

式中符号的意义详见文献[1]。

1.3 桩长

桩长应根据建筑物对地基的要求,建筑场地湿陷类型、湿陷等级及湿陷土层厚度等条件,并按照复合地基承载力及变形的要求,进行综合确定。刚性桩用于高层建筑地基时,承载力要求较高,一般桩尖应选择强度较高的持力土层上。

1.4 布桩范围

通常情况下刚性桩都布在基础范围内,黄土地基为增强地基的稳定性,处理宽度要求超出基础边缘一定范围,防止基底下被处理的土层在附加应力作用下受水浸湿时产生侧向变形,并使处理与未处理交界面的天然土体保持稳定。因此,刚性桩布桩范围应符合国家标准(GBJ 25-90)中挤密桩处理地基的宽度要求。

可在基础范围以外布置土或灰土挤密桩,作为围护桩,主要用来消除湿陷性,较布置刚性桩节省造价。

1.5 褥垫层

褥垫层是保证桩土共同作用的重要措施,厚度一般取 10~30 cm,褥垫层材料可采用中粗砂、碎石、级配砂石等^[2]。

1.6 复合地基承载力

复合地基承载力的确定,比较可靠的方法是采用单桩或多桩复合地基载荷试验实测,设计估算常采用承载力叠加计算法,即荷载大部分由土承担,单桩承载力取标准值,考虑到安全因素,应按饱和状态下的土性指标进行桩的侧阻与端阻力的取值。湿陷性黄土经挤密消除湿陷性后,桩间土的承载力会有较大幅度提高,桩间土强度提高系数将大于 1.0,设计时一般仍按挤密前湿陷性土的承载力进行计算,

富余的强度作为安全储备。

2 刚性桩复合地基褥垫层的设置原则

褥垫层是建筑科学研究院地基所在 CFG 桩成套技术中提出的,现已成为刚性桩复合地基的重要组成部分。通常在基础与桩顶之间设置一定厚度的柔性垫层。

2.1 有垫层条件下刚性桩复合地基承载性状
实测的桩土应力比 n 、地基土分担荷载比 η_s 随荷载变化的关系曲线见图 1 和图 2。

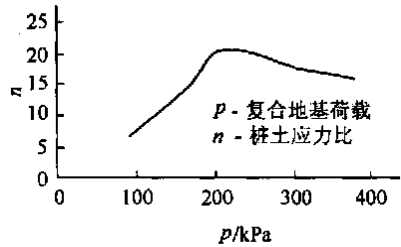


图 1 荷载与桩土应力比曲线图

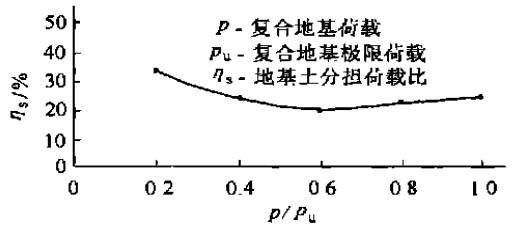


图 2 $\eta_s - p/p_u$ 关系曲线图

在荷载作用初期,由于褥垫层的作用,桩土共同承受上部荷载,此时桩土应力比 n 值较小、地基土分担荷载比 η_s 值较大。随着荷载的进一步增加,桩顶逐渐向垫层刺入,桩的作用逐渐显示出来,荷载向桩身集中,此时 n 值逐渐增大, η_s 值逐渐减小。当荷载继续增加到一定值($p/p_u = 0.5 \sim 0.6$)时, n 值与 η_s 值分别出现峰值及低谷,此时桩的应力集中现象最显著,桩已发挥了极限承载力的 70% 左右,它标志着桩对垫层的刺入量已基本稳定。随着荷载的进一步增加,桩的刺入量增加很少,此时 n 值有所降低, η_s 值有所增加,桩土变形已趋同步,桩间土分担荷载增量大于桩分担的荷载增量,桩的承载力充分发挥^[3]。若

再进一步增加荷载,由于复合地基中桩的荷载-沉降(p_p-s)曲线呈加工硬化型^[4],桩还可以承受较大的荷载增量,但其桩顶荷载增加量很小,荷载增量绝大部分均由桩间土分担,直至达到桩间土的极限承载力,这时复合地基方告破坏。

2.2 无垫层条件下刚性桩复合地基承载性状

当基础下不设褥垫层时,桩顶直接与基础接触。根据变形协调原则,桩与桩间土的变形应相同。由于桩的变形模量远大于桩间土的变形模量,在垂直荷载作用下,当荷载小于桩的允许承载力时,基础传来的荷载首先由模量较大的桩来承担,桩间土承担的荷载很少。随着荷载的增加,当桩顶荷载超过其允许承载力时,桩端土将由弹性变形进入塑性变形阶段,桩发生一定沉降,荷载逐渐转移到土体。随着荷载的进一步增加,桩的承载力发挥至极限,桩的沉降可能已达40~60 mm。由于沉降量较大,桩间土亦承担了相当的荷载增量,若再进一步增加荷载,由于复合地基中桩的荷载-沉降(p_p-s)曲线呈加工硬化型,故其仍可继续承担荷载,但其桩顶荷载增加量很小,荷载增量绝大部分均由桩间土分担^[5]。

2.3 褥垫层的设置原则

刚性桩复合地基设计与不设褥垫层,主要区别是桩间土承载力发挥的过程不同。当设置褥垫层时,桩间土一开始就承担了较大比例的荷载,在正常使用状态下,建筑物荷载主要由桩和桩间土共同承担;而不设褥垫层时,基础直接与桩和桩间土接触,建筑物荷载先由桩来承担,随着时间的增加,桩发生一定的沉降,荷载逐渐向土体转移,类似于在桩基中发挥桩间土的承载能力而形成的“复合桩基”的设计思想。显然,若不考虑桩与桩间土的相互作用及群桩效应,有、无垫层复合地基的极限承载力均为桩与桩间土极限承载力之和,而褥垫层只能调整复合地基应力的分布,并不能提高复合地基的极限承载力。

有垫层刚性桩复合地基承载力设计原则

首先将土的承载力用足,不够部分由桩来承担,其安全储备在于桩。无垫层复合地基是先充分发挥桩的承载力,其余荷载由桩间土来承担,以桩间土强度作为安全储备,设计思想是用桩来补偿、改善天然地基,充分利用桩的承载力来减少桩数,在这种情况下,桩可充分发挥并能继续保持其全部极限承载力。此时,桩不是单纯地用作承重,还主要用于控制沉降。

无垫层复合地基形成的条件是桩是摩擦桩或是端承作用较小的端承摩擦桩,考虑桩与桩间土共同承受荷载,若为端承桩,由于基础下无垫层,桩的沉降很小,桩上的荷载向土上转移数量很小,桩间土难以直接承受荷载,难以形成复合地基。所以桩、基础共同作用是有条件的:①地基土不发生因自重固结、湿陷、震陷等原因产生的与承台脱空现象;②桩属非端承桩,桩端有一定的刺入变形。

由于桩的承载力在无垫层复合地基中起决定性作用,必须考虑群桩效应,为充分发挥桩的承载力,桩的间距以大桩距最有利(4~6 d)。此时,桩可设计成能承受极限荷载的构件,桩发挥极限承载力之后,再由基础分担设计荷载的剩余部分。

在工程应用中,以提高承载力为主要目的的刚性桩复合地基,为充分发挥桩间土的承载力,应在桩顶与基础之间设置褥垫层。对于以减少沉降为主要目的的刚性桩复合地基,桩顶与基础之间不宜设褥垫层,尽可能大地发挥桩的承载力。在这种情况下,由于桩实际承担的荷载很大,桩间土承载力的发挥有赖于桩的沉降变形。因此,要考虑桩顶上的压力达到桩的极限承载力时不至造成桩体强度破坏,此时可相应地提高桩顶的砼强度,或在桩顶设置短钢筋笼,形成钢筋砼桩复合地基;另外,桩对基础也会产生应力集中,还应对基础进行抗冲切验算。

无垫层条件下刚性桩复合地基是先充分发挥桩的承载力,荷载再向土体转移,从桩土共同承担荷载的受力机理来说,应该算是另一

种形式的刚性桩复合地基。由于桩体与基础无联结,显然又不属于桩基础的范畴,但其受力机理又与复合桩基比较类同,可以认为是介于复合地基与桩基础之间的一种刚性桩复合地基。

3 刚性桩复合地基承载力的修正

刚性桩复合地基用于高层和超高层建筑时,一般有较强的基础埋深,即有更大的边荷载,边荷载对复合地基承载力及变形有多大影响,如何合理地对其承载力进行修正,对复合地基的设计有重要意义。

3.1 复合地基中桩的承载性状

复合地基中,桩间土表面作用着桩间土应力 σ_s ,桩间土应力 σ_s 在不同深度产生的附加应力,使桩周正应力有较大的增量,在桩侧土中产生附加应力,桩身受到一个正向压力增量,桩侧阻力也相应增大,导致桩的侧阻增加。桩间土应力产生的附加应力增量,也使桩端处垂直应力加大,形成桩端边载效应,减少主应力差,增加桩的端阻力。

3.2 复合地基中土的承载性状

试验表明^①,边荷载对刚性桩复合地基桩间土承载力的提高十分明显,主要原因是边荷载的作用抑制了基础外侧土体向上隆起的趋势,桩间土的侧向变形受到限制,从而使土的垂直变形减少。另一方面由于复合地基中桩的存在,使桩间土的变形受到桩的约束,侧向变形受到制约,从而使土的垂直变形减少。这样,在边荷载与复合地基中桩的共同作用下,其承载力及模量较天然地基土有十分明显的提高。

3.3 桩土荷载分担比

在有边荷载条件下,由于桩间土承载力及变形模量的提高,使桩土应力比降低,桩的荷载分担比也有所降低,而桩间土的荷载分担比增高,桩需要在更高的总荷载下才能发挥其承载力,其桩体作用的安全系数较无边荷载时有

所提高。

经过以上分析可以发现,复合地基中桩承载力较自由单桩有大幅度提高,但边荷载对复合地基中桩承载力的影响不大,主要是通过提高桩间土的承载力来提高复合地基的承载力。

鉴于边荷载对复合地基承载力的影响,对复合地基承载力应进行修正,现阶段工程技术人员采用多种方法进行承载力修正,总结起来有三种方法:

①《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—91)法

这是目前应用最广的方法,即沿用复合地基承载力修正的通常作法,不作宽度修正,深度修正系数取1.0。

②《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)法

有专家认为行业标准(JGJ 79—91)规定的复合地基承载力修正系数过于保守,建议按加固前天然地基土的性状选取^[6],依据国家标准(GBJ 7—89)表5.1.3取值。

③先修正再复合算法

也有人先对桩间土承载力进行深宽修正,求得设计值后,用桩间土设计值计算复合地基承载力。

3.4 工程算例

某工程地基土层为粘土 $f_k = 150 \text{ kPa}$, $e = 0.75$, $I_1 = 0.48$, $\gamma_0 = 16.5 \text{ kN/m}^3$,基础埋深为4.5 m,采用CFG桩复合地基,桩径400 mm,置换率 $m = 6.4\%$,单桩承载力标准值 $R_k = 150 \text{ kN}$ 。(本例仅考虑承载力的深度修正)

复合地基承载力标准值为:(α 取1, β 取0.9)

$$f_{sp,k} = mR_k/A_p + \alpha\beta(1-m)f_k = 202.8, \text{ kPa} \quad (2)$$

①JGJ 79—91规范法:

① 阎明礼,李春灵·有边荷载条件下CFG桩复合地基性状·地基处理,2000.11(3):82~87

$$f = f_{sp,k} + \gamma_0(4.5 - 0.5) = 268.8, \text{kPa} \quad (3)$$

②GBJ 7-89 规范法:(η_d 取 1.6)

$$f = f_{sp,k} + \eta_d \gamma_0(4.5 - 0.5) = 308.4, \text{kPa} \quad (4)$$

③先对天然地基进行承载力修正,再计算复合地基承载力:

$$f_v = f_k + \eta_d \gamma_0(4.5 - 0.5) = 255.6, \text{kPa} \quad (5)$$

$$f = mR_k / A_p + \alpha \beta(1 - m)f_v = 291.7, \text{kPa} \quad (6)$$

上述三种方法得到的结果各异,最大相差 39.6 kPa。行业标准(JGJ 79-91)规定的深宽修正系数是如何确定的,没有说明,可能是由于需要加固的地基土,多属淤泥、淤泥质土及人工填土等软弱土,这类土一般宽度修正系数取零,埋深的修正系数取 1.0。

为承担高层、超高层以及重型建筑物的巨大荷载,实际工程中更多地将具有较高承载力的良好地基与刚性桩组成复合地基,进一步提高地基的承载能力,而对于这类土质,深度修正系数取 1.0,可能在很大程度上低估其承载力,造成浪费。

方法③与方法②对比后可以发现,方法③仅少了对桩所占面积的土承载力的修正,由于刚性桩的置换率一般较小(小于 10%),考虑到桩间土的承载力较天然地基土的承载力修正值高及桩体的安全系数也有提高,该方法对承载力设计值的估算,应该还是比较保守的。

由于复合地基中桩对桩间土变形的遏制,桩间土的承载力(设计值)显然大于天然地基土的承载力(设计值),方法②综合考虑了边载荷对地基稳定性及复合地基承载力的影响,采用天然地基土的承载力修正方法进行复合地基承载力修正,能够保证足够的安全系数。

综上所述,对强度较高的土(天然地基规范给出的深度修正系数较高),常规的复合地

基承载力修正方法,可能在很大程度上低估其承载力,建议对这类复合地基,考虑桩间土原有的性状,采用天然地基的修正方法进行修正。

4 结 论

1)采用挤密刚性桩处理湿陷性黄土形成复合地基,既可消除湿陷性,又能大幅度提高承载力,尤其适用于高层建筑,值得研究和推广。

2)无垫层复合地基应为刚性桩复合地基的一种重要组成型式,其受力特征是首先充分发挥桩的承载力,然后由桩间土承担剩余荷载,在减少沉降为主要目的的情况下,宜优先选用。

3)《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-91)规定的复合地基承载力修正系数,对强度较高的土来说比较保守,刚性桩复合地基承载力深度修正系数的取值,建议按地基加固前天然地基土的性状选取,这样对强度较高的土,可安全、合理、适当地提高复合地基承载力。

参 考 文 献

- 1 GBJ 25-90 湿陷性黄土地区建筑规范
- 2 董忠级,王建制. CFG 桩在湿陷性黄土地基中的应用. 工程勘察, 1998(4): 29~31
- 3 张雁,黄强. 半刚性桩复合地基性状分析. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 87~88
- 4 阎明礼主编. 地基处理技术. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 227~244
- 5 乔来军,姬深堂等. CFG 桩复合地基的讨论. 岩土工程技术, 1999(4): 20~21
- 6 何广讷. 复合地基承载力标准值修正的探讨. 见: 龚晓南编. 复合地基理论与实践学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. 43~46
- 7 GBJ 7-89 建筑地基基础设计规范
- 8 JGJ 79-91 建筑地基处理技术规范

收稿日期: 2002-01-28