

碎石桩复合地基设计方法的探讨

李燕杰¹ 牛志民²

(1. 东华理工学院,江西抚州 344000; 2. 中国兵器工业北方勘察设计研究院,河北石家庄 050021)

【摘要】 通过对碎石桩复合地基承载力和抗震液化设计的对比和分析,提出了以承载力和抗震液化相互综合考虑的设计方法。

【关键词】 碎石桩;复合地基;承载力;抗震液化

【中图分类号】 TU 472

Discuss On Design Methods of Gravel Pile Composite Foundation

Li Yanjie¹ Niu Zhimin²

(1. East China Geological Institute, Fuzhou Jiangxi 344000;

2. China Ordnance North Industry Institute of Geotechnical Survey & Design, Shijiazhuang Hebei 050021 China)

【Abstract】 By the comparison and analysis of composite foundation of gravel pile for bearing capacity and anti-liquefaction design, a new design method including bearing capacity and anti-liquefaction is presented.

【Key Words】 gravel pile; composite foundation; bearing capacity; anti-liquefaction

0 引言

碎石桩(Gravel Pile)又称粗颗粒土桩(Granular)是采用振动、冲击、水冲、机械成孔等方式在软弱地基中冲孔,然后再将砾石、卵石、碎石等压入或夯实到孔中形成扩大桩体,桩与桩间土形成复合地基^[1]。采用碎石桩加固的粉土、砂土等地基,可使承载力增大、沉降量减小、防止地基土的地震液化和提高软粘土的整体稳定性。在碎石桩复合地基的设计方面,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)主要从地基土承载力的设计给出了一些基本设计原则,未详尽介绍碎石桩抗震液化的设计。

目前碎石桩复合地基的设计主要考虑承载力的设计,然后再进行桩间土的地震液化的判别。这种设计思路在抗震液化和承载力设计中很难得到一个优化的设计方案。往往在实际工程中造成浪费。其抗震防液化和复合地基承载力的综合考虑的设计思路已在一些工程中得到了应用。

1 碎石桩的承载机理及作用

碎石桩在成桩过程中对周围的土层振密、挤密和碎石的压入效果,使地基土孔隙比减小,密实度增加,承载力增大,同时碎石和褥垫层作为良好的排水通道,有利于砂土、粉土的超静孔隙水消散,有效地增强土体的抗液化能力。

1.1 对地基土的加密作用

碎石桩在成孔和挤密碎石中,桩周土在水平和垂直振动力作用下产生径向和竖向位移,使桩周土体密实度增加;另一方面土体在反复振动作用下,使土体振动液化,液化后的土颗粒在上覆土压力、重力和填料挤压力作用下,土颗粒重新排列、组合成更加密实状态,从而提高了桩间土的抗剪强度和抗液化性能。

1.2 排水减压作用

碎石作为良好的透水材料,在地震或振动作用下能加速孔隙水的消散。使孔隙压力的消散和增长同时发生,降低了由于地震及动力机械振动时产生的超孔隙水压力,提高了地基的抗液化能力。

1.3 减振作用

由于碎石桩的桩体强度远大于桩间土的强度,在荷载作用下应力向桩体集中,尤其在地震剪应力作用下,应力集中于桩体,减小了桩间土中剪应力。同时碎石桩在施工过程中由于地基土在往复振动作用下地基土局部可产生液化,达到了地基土的预振作用。即碎石桩具有减振作用。

2 碎石桩复合地基设计

碎石桩复合地基设计包括以下几个方面:施工机械的选取,处理范围的确定,桩径、桩间距的确定,

碎石粒径及填料量的确定。其中施工机械的选取和碎石粒径及填料量的确定已有较为成熟的经验,这里主要对桩径和桩间距的确定进行分析。

2.1 以承载力为主复合地基的设计

由复合地基承载力计算公式

$$f_{\text{spk}} = mf_{\text{pk}} + \alpha(1-m)f_{\text{sk}} \quad (1)$$

$$m = A_{\text{p}}/A = d^2/d_e^2 \quad (2)$$

$$\text{等边三角形布桩 } d_e = 1.05s \quad (3)$$

$$\text{正方形布桩 } d_e = 1.13s \quad (4)$$

式中: f_{spk} 、 f_{pk} 、 f_{sk} 分别为复合地基承载力、碎石桩、天然地基承载力的特征值; m 为桩土面积置换率; α 为夯扩挤密系数; A_{p} 、 A 分别为桩的截面积和加固面积; d 、 d_e 分别为桩身平均直径和一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径; s 为桩间距。

由复合地基承载力特征值可计算出面积置换率和桩间距,然后在施工(试桩)中由《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)中的标准贯入试验方法和计算公式进行地基土的液化判别,若桩间土的标准贯入锤击数大于液化判别标准贯入锤击数临界值,则满足设计要求;若不能满足,则修改设计方案。其液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 为:

$$N_{\text{cr}} = N_0[0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/p_c} \quad (d_s \leq 15) \quad (5)$$

$$N_{\text{cr}} = N_0(2.4 - 0.1d_w) \sqrt{3/p_c} \quad (15 \leq d_s \leq 20) \quad (6)$$

式中: N_{cr} 、 N_0 为液化判别标准贯入锤击数临界值和基准值; d_s 为饱和土标准贯入点深度; p_c 为粘粒含量(质量分数),当小于 3 或为砂土时,应采用 3; d_w 为地下水位的深度。

随着工程实践的增多,建造在可液化地基上的低、多层建筑物,基底压力一般较小,按承载力要求进行设计的方法不能突出以抗震液化设计为主的设计思路,而在桩间土的判别上只考虑桩间土的挤密作用未考虑碎石桩的排水减压和减振作用。这种设计方案往往在工程中造成浪费。

2.2 以抗液化为主的设计

目前在碎石桩抗震设计中主要有两种设计思路,一种为只考虑碎石桩的加密作用,另一种为碎石桩加密作用、排水减压和减振作用的综合考虑的设计理念。

2.2.1 考虑碎石桩加密作用的设计计算

确定碎石桩桩间距可采用下面计算公式

正三角布桩

$$s = 0.952D \sqrt{(1+e_0)/(e_0-e_1)} \quad (7)$$

正方形布桩

$$s = 0.886D \sqrt{(1+e_0)/(e_0-e_1)} \quad (8)$$

式中: D 为碎石桩的平均直径; e_0 为天然土的初始孔隙比; e_1 为加固后桩间土要求达到的孔隙比。

桩间距的确定需要知道 e_0 、 e_1 两个参数。 e_0 可由室内土工试验测得, e_1 可按土层达到液化临界锤击数和孔隙比的关系来求得。各国学者对标准贯入试验锤击数和孔隙比、相对密实度的关系建立了许多经验公式^[2-5],由经验公式可计算出 e_1 。

上述公式是假定加固土层没有流失,没有侧向位移和不发生竖向应变,即夯扩成桩过程中地面不下沉不隆起。但大量的工程经验证明,在不同土质情况下,土体均发生不同程度的下沉或隆起,这些施工中可能存在的因素在设计中未进行充分的考虑。

2.2.2 考虑碎石桩多种抗液化作用的设计方法

近年来随着地基土液化理论发展和工程实践的增多,许多学者注意到碎石桩复合地基抗液化的多重作用,提出了多种抗液化作用的设计方法,何光讷基于当量标贯法,将碎石桩复合地基抗液化功效近似量化,进一步形成了以抗液化为目的的复合地基设计^[2]。

考虑到碎石桩复合地基的多种抗液化作用,复合地基液化判别处的标准贯入锤击数的临界值 $N_{\text{cr,F}}$ 可表示为

$$N_{\text{cr,F}} = \eta_u \eta_r N_{\text{cr}} \quad (9)$$

式中: η_u 为碎石桩排水减压功效的液化消减系数; η_r 为碎石桩桩体应力集中效应的减振系数; N_{cr} 为桩间土液化判别处标准贯入锤击数临界值,仍可由式(4)、式(5)求得。何光讷基于日本柳崛羲彦等人^[6]的试验研究成果对 η_u 进行了量化^[2]。复合地基共同承担地震应力时桩体应力效应系数 η_r 可由下式计算

$$\eta_r = k\tau_s/\tau = k/1 + m(n-1) \quad (10)$$

式中: τ_s 为桩间土上的地震剪应力; τ 为作用在复合地基上的剪应力; n 为桩土应力比; k 为分项安全系数。

设计时结合场地土的密实度,标准贯入击数,通过土的密实度和标准贯入锤击数之间的经验关系^[2-5]可以获得判别处土的抗液化临界孔隙比 $e_{1,F}$,代入式(7)、式(8)就可计算出桩间距。

按抗震设计为主的设计思路,在承载力和抗震液化的设计中较为合理。值得一提的是,上述的设计方法是假定土层没有流失,且仅发生侧向位移,不

发生竖向应变,即成桩后地面不隆起不下沉的条件下得到的,对不同的施工工艺,应考虑土层的流失比和竖向变形。

3 工程应用

某一住宅小区,采用砖混结构,筏板基础,地基持力层为新近沉积的砂质粉土、粉细砂,承载力较低($f_{ka}=100$ kPa)且为中等液化,液化层底深度4.6~6.0 m。地下水类型为潜水,主要含水层为粉细砂③、中砂④,静止水位埋深1.50~3.50 m。场地历年最高地下水位接近自然地面。场地地层为:

①填土:黄褐色,湿~饱和,主要为粘质粉土,含少量砖块、石灰渣等杂物,结构松散,局部为杂填土。

②新近沉积砂质粉土:褐黄色,湿,稍密。土质不均,含云母片,夹粘质粉土薄层,标贯击数为5~12击。 $f_{ak}=100$ kPa。

③新近沉积粉细砂:褐黄~灰黄色,饱和,中下密,砂质不纯,含少量粘性土团块,可见蚌壳,标贯击

数为6~12击。 $f_{ak}=100$ kPa。

④中砂:灰色,饱和,中密~密实,砂质纯,可见云母片。标贯击数为18~32击。 $f_{ak}=200$ kPa。

⑤粉质粘土:黄褐色,可塑~软塑,土质不均,含铁锰氧化物结核,偶见姜石。

⑥粉质粘土:褐黄色,可塑,土质不均,含铁锰氧化物结核,偶见姜石。 $f_{ak}=170$ kPa。

⑦细砂:褐黄色,饱和,密实,含少量圆砾。

⑧粘质粉土:褐黄色,可塑,土质不均,含砂质粉土团块,可见铁锰氧化物结核云母片,夹粉质粘土⑧₁薄层。

根据承载力和抗震两种设计方案的优化考虑,最终设计主要以抗震设计为主要考虑,采用桩间距为1.5 m×1.5 m。施工结束后经载荷试验和标准贯入试验等手段检测表明,加固后的地基土承载力和地基土的抗震液化满足设计要求。其标准贯入试验锤击数和载荷试验见表1和图2。

表1 地层标准贯入试验数值统计表

时 间	地 层	标 贯 范 围 值	标 贯 平 均 值
处理前	新近沉积砂质粉土	4~8	5.6
	新近沉积粉细砂	5~12	8.5
处理后	新近沉积砂质粉土	16~35	22.6
	新近沉积粉细砂	20~43	28.4

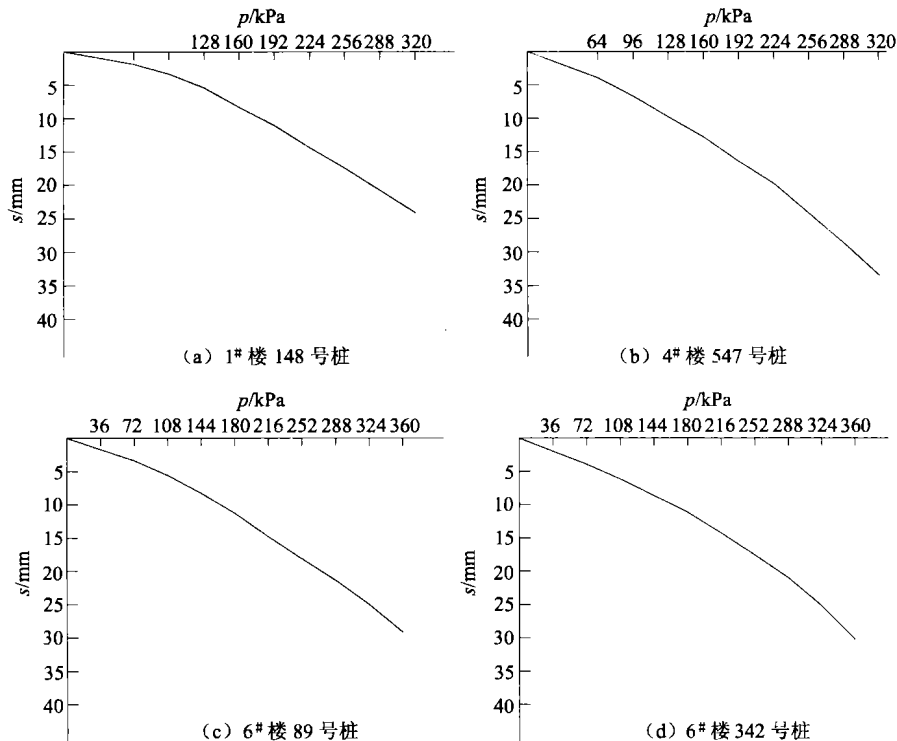


图2 载荷试验 $p-s$ 曲线

(下转第55页)

线及上水管线漏水严重,使桩后地层进一步含水、软化,降低了土体的抗剪强度,土压力增加弯距加大,造成10月24日的日变形达 -234 mm ,累计变形 -260 mm 。后来业主在坡顶挖土卸荷,并在该段22根桩范围内浇注C25混凝土厚度 3.5 m ,使累计变形 -260 mm 时趋于稳定。

2)桩位线上有一塔吊基础(4~5根桩位),造成该侧支护桩冠梁断开不连续,不能形成封闭,又由于施工期间为了抢工期将锚杆上调至冠梁处,减少了安全储备,取消腰梁削弱了该侧支护桩的整体刚度。

3)二次加固锚杆施工时,施工单位未按设计标高进行施工,将锚杆的标高上提 1 m ,造成第二排锚杆受力增大,支护桩的受力条件与计算模型的条件发生变化,弯距增大,22根桩多处水平向产生裂缝,也是产生变形的原因之一。

5 结论

1)基坑工程是一项非常重要的岩土工程,一旦出现事故,造成的后果严重,不能为了迎合业主冒风险。

2)对缺少设计及施工经验的地区,应进行详细的调研工作,设计方案应通过当地主管部门组织的专家论证。

3)以粉质粘土地层为主的鞍山地区,粘聚力取值按勘察报告提供的三轴数值,并按 $45\%\sim 60\%$ 折减是可行的,但对于周边有上水管线及热力管网管渗漏现象时,同一场地不宜采用相同的岩土设计参数,粘聚力 c 值取 $20\sim 25\text{ kPa}$ 左右为宜。

4)基坑设计时应查明基坑周边是否有上水管线及其他管线的渗漏现象,渗漏处岩土设计参数应进行折减。

5)必须严格按设计施工,不宜轻易改变锚杆的位置、标高,当施工达不到设计技术要求时应及时与设计沟通,采取相应的措施。

6)坡顶地面附加荷载不应超过设计参数,当出现超标情况时,应书面通知业主危害性及出现的后果。

7)冠梁应尽量形成封闭,锚杆不要设计到冠梁上,以增大基坑的安全储备。

参 考 文 献

- [1] 张维正,侯永莉. 大连某基坑支护工程变形分析及加固措施[J]. 岩土工程技术,2002(2):115-118.
- [2] 黄强主编. 深基坑支护工程技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,1995.
- [3] 黄熙龄主编. 高层建筑地下结构及基坑支护[M]. 北京:宇航出版社,1994.
- [4] 张仲先,等. 某22层建筑物桩基事故的处理[J]. 岩土工程技术,2000(4):238-241;246.
- [5] 方江华,等. 深基坑支护技术综述[J]. 西部探矿工程,2003(1):28-30.
- [6] 高大 主编:深基坑工程[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [7] 李继业,等. 深基坑支护存在的问题与研究方向[J]. 建筑技术开发,2001(11).
- [8] 杨天鸿,等. 基坑开挖引起围岩变形破坏过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程技术,2002(5):293-296.
- [9] 夏洪浪,等. 深基坑周围地表沉陷分析[J]. 西部探矿工程,2005(9):30-31.
- [10] 王 典,等. 深基坑工程病害事故的应急处理[J]. 西部探矿工程 2005(1):13-14.

收稿日期:2005-11-16

(上接第50页)

4 结论

碎石桩复合地基目前大多对承载力进行设计,然后进行地震液化的判别。对承载力和抗震液化的优化设计目前尚处于研究阶段,要形成一套成熟的设计方法,还须进行大量的试验研究,积累大量的试验数据以供定量计算。

参 考 文 献

- [1] 黄春霞,张鸿儒,白顺果. 碎石桩复合地基抗液化设计方法的分析[J]. 岩土工程技术,2004,18(6):307-310.
- [2] 何广讷. 振冲碎石桩复合地基[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

版社,2001.

- [3] Skempton A W. Standard penetration and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation [J]. Geotechnique, 1986, 36(3):425-447.
- [4] 王士杰,张吉占,杨路华. 标贯 N 值的归一化及相对密度的关系[J]. 工程勘察,1998(2):17-21.
- [5] 章连洋,等. 抗液化振冲挤密桩间距的实用计算[J]. 勘察科学技术,1993(1):16-20.
- [6] 柳岷羲彦,落河真,等. 瀨水水门置換砂の液化予測と対策[J]. 土と基础,1975,23(6):11-16.

收稿日期:2005-10-18