

碎石桩复合地基抗液化设计方法的分析

黄春霞 张鸿儒 白顺果

(北京交通大学土木建筑学院, 北京 100044)

【摘要】 对碎石桩复合地基抗液化设计方法进行了分析评价, 并对施工技术作了介绍。基于复合地基抗地震液化作用的分析, 提出一种合理的抗液化设计方法, 该方法能够体现碎石桩复合地基的加密、排水和减震三方面的抗地震液化作用。

【关键词】 复合地基; 碎石桩; 抗液化设计

【中图分类号】 TU 472.31

Analysis on Design Methods of Composite Foundation of Gravel Pile for the Liquefaction Resistance

Huang Chunxia Zhang Hongru Bai Shunguo

(School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 China)

【Abstract】 An evaluation of current design methods of composite foundation of gravel pile for the liquefaction resistance is presented. Also, an overview of construction techniques is briefly discussed. Based on analysis effectiveness of gravel pile for the resistance of soil liquefaction during earthquake, the effects of densification, drainage and seismic reducing should be included in a proper liquefaction-resistance design method.

【Key Words】 composite foundation; gravel pile; liquefaction; design

0 引言

地震液化引起的地基失效在历史上曾造成大量建筑物和构筑物的破坏。我国的邢台、海城和唐山地震, 美国阿拉斯加(Alaska)和日本新潟(Niigata)等大地震都引起普遍的液化现象, 给公路、铁路、桥梁、水利设施、地下管道等造成了严重的损坏。地震液化已引起岩土工程界的普遍关注, 并出现了多种处理方法, 如换土、加密、采用桩基、加入固化剂、设置地下围护墙和碎石桩等。其中, 碎石桩由于具有加固效果好、施工方便、成本低廉等优点, 逐渐发展成为一种应用广泛的抗震防液化加固手段, 并且这种加固技术的有效性已经得到实际地震的证实^[1,2]。

然而, 碎石桩加固可液化地基的设计仍处在一个经验性的阶段, 带有相当的盲目性, 致使具体的设计往往存在一定的保守性或风险性。目前以消除液化为主要目的的碎石桩复合地基设计方法中多数只考虑碎石桩对桩间土的挤密作用, 过于保守, 造成很大浪费, 甚至由此产生的设计方案, 给施工带来很大的

困难。近年来也有一些学者注意到碎石桩抗液化的多种作用, 提出考虑多种抗液化作用的设计方法, 但要应用于实际工程仍需进一步的研究。

1 施工技术

碎石桩(Gravel Pile)又称为粗颗粒土桩(Granular Pile), 是指用振动、冲击或水冲等方式在软弱地基中成孔, 再将砾石、卵石、碎石等压入已成的孔中, 形成大直径的由碎石等所构成的密实桩体。碎石桩最早始于 1835 年, 在法国 Bayonne 地区用于在海湾沉积软土上建造兵工厂的地基工程中。此后, 在很长时间内由于缺乏先进的施工工艺和施工设备, 没有较实用的设计计算方法而发展缓慢。直到 1937 年德国人发明了振动水冲法(Vibroflotation)(简称振冲法)后, 碎石桩才被推广应用。上个世纪 50 年代后期, 出现了振动式和锤击式施工方法。我国常用的抗液化碎石桩施工技术主要有振冲法和干振法两种。

振冲法是以起重机吊起振冲器, 启动潜水电机

带动偏心块,使振冲器产生高频振动,同时开动高压水泵,使高压水由喷嘴射出,在边振边冲的作用下,将振冲器逐渐沉至土中的设计深度。清孔后即从地面向孔内逐段填入经筛选的碎石,振冲器上拔形成桩体,最终使碎石桩体与原状土体构成复合地基。地基加固处理中,振冲碎石桩由于具有施工方便,费用较廉,不用钢筋、水泥等优点,并作为抗震防液化处理手段而得到了大量应用,取得不少经验。但由于目前所使用的振冲器都是湿法机型,存在耗水量大和泥浆污染严重的缺陷,不适宜在城市和粉土层上施工。

干振法是在振冲桩基础上发展起来的,利用振动或冲击荷载预沉导管,通过桩管灌入碎石,在振、挤、压作用下形成较大密度的碎石桩,由于它克服了振冲法的严重缺陷,在我国得到广泛的应用。根据沉桩工艺的不同又可分为振动式和锤击式沉管桩。

振动沉管桩通过电机振动打桩机,利用振动荷载将桩管沉入可液化土层,通过桩管灌入碎石,形成较大密度的碎石桩,与周围土体一起构成复合地基。1958年日本开始采用振动重复压拔管施工方法。这一方法的采用,使碎石桩地基处理技术发展到一个新的水平,使施工质量、施工效率和处理深度都有显著提高。锤击沉管桩就是通过锤击的方式将桩管沉入到设计深度,通过桩管灌入碎石形成的碎石桩。在采用干振法加固可液化地基中大多采用前者。

2 碎石桩复合地基抗液化作用

可液化土体的颗粒骨架疏松且多为不稳定结构,当其遭受强烈震动时,土体趋向密实、体积减小。如果充满土孔隙中的水难以及时排出,土孔隙无法减小,体积就不能发生改变,土骨架呈松弛状态,土粒间的有效应力就逐渐地转移到孔隙水上,形成了超静孔隙水压力(即超出相应静孔隙水压力的值,简称超孔隙水压力)。随着震动的持续作用,土中超孔隙水压力不断地聚集、提高,当其值达到相应的固结压力,粒间应力(即有效应力)为零,土粒之间没有了接触也就出现了液化现象。因此,砂土要产生液化必须具备三个条件,即疏松饱和、排水不及时和强烈震动^[3]。而碎石桩复合地基正是直接改善导致砂土液化的这三个不利因素。现有的一些研究已经表明,在可液化土层中设置碎石桩可以通过以下作用来减轻或消除液化^[3~8]:①增加桩周土体的密度;②通过桩体的排水来限制超孔隙水压力的增长;③桩体分担地震水平剪应力作用(桩体减震作用)。

2.1 碎石桩的加密作用

由现场试验资料可知,振冲和干振法形成的碎石桩复合地基密实度都得到了提高。振冲碎石桩在成孔和挤密碎石的过程中,一方面桩周土体在水平激振力作用下产生径向位移,使桩间土密度提高。另一方面,振冲器的振动力在土体中传播振动和加速度,在振冲器周围一定范围内的土体受到反复的振动和剪切循环荷载作用而产生振动液化,液化后的土颗粒在重力、上覆土压力以及填料挤压力的作用下重新排列,孔隙比减小,体积收缩,趋于密实,从而形成密实的碎石桩复合地基。干振碎石桩在成桩过程中,激振器产生的振动通过导管传递给土层使其附近的饱和土地基产生振动孔隙水压力,导致部分土体液化,土颗粒重新排列趋向密实,从而起到振密作用;下沉桩管时桩管对周围砂层产生很大的横向压力,将土体中等于桩管体积的土挤向周围土体使之密实,灌注碎石后振动、反插也使周围土体受到挤密,从而提高了地基的抗剪强度和抗液化性能。

2.2 碎石桩的排水减压作用

复合地基中的碎石桩是以透水性很好的碎石构筑,可以缩短渗透路径,改善排水条件,因此在地震期加速孔隙水压力的消散,使孔压消散与增长同时发生,降低由于循环荷载作用而产生的超孔隙水压力,以防止地基液化,大大提高了地基的抗液化能力。

2.3 碎石桩的减震作用

由于碎石桩复合地基中桩体的刚度远大于桩间天然土体,地震荷载将因地基的初始应力状态和刚度发生了变化而产生应力的重新分布。因此,当碎石桩和周围的土体一起变形时,地震剪应力在相对刚度较大的碎石桩上会产生地震剪应力的集中,因此减小了作用在桩间土上的剪应力水平,即碎石桩具有减震的作用。

3 现有设计方法及其分析评价

碎石桩复合地基抗地震液化的设计应该包括以下几方面的内容:处理范围的确定;桩径和桩间距的确定;填料的选用和填料量的估算。其中,由于桩径和处理深度分别取决于施工机械设备和可液化土层的埋深及厚度,填料的选用和填料量的估算已有较成熟的经验,所以这里主要讨论碎石桩桩间距确定的方法。

3.1 以承载力要求进行的设计方法

由复合地基承载力计算公式

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

式中: f_{spk} 、 f_{pk} 、 f_{sk} 分别为复合地基、碎石桩和桩间土承载力标准值; m 为桩土面积置换率, 亦即碎石桩面积与影响面积之比。

$$m = \frac{A_p}{A} = \frac{d^2}{d_e^2} \quad (2)$$

正三角形布桩: $d_e = 1.05L$

正方形布桩: $d_e = 1.13L$

式中: A 、 A_p 分别为加固面积、桩截面积; d 、 d_e 分别为桩的直径和等效影响圆的直径; L 为桩间距。

由复合地基要求达到的承载力标准值就可以推求桩土置换率, 进而可以确定桩间距, 然后按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001) 中的标准贯入试验方法进行桩间土的抗液化校核, 若桩间土的标准贯击数大于由规范计算出的临界值 N_{cr} , 则设计满足要求, 否则修改设计方案, 使其达到抗液化要求。桩间土所需满足的液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 为:

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

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1d_s) \sqrt{3/\rho_c} (15 \leq d_s \leq 20) \quad (4)$$

式中: N_{cr} 为液化判别处的标准贯入锤击数临界值; N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值; d_s 为饱和土标准贯入点深度; d_w 为地下水位深度; ρ_c 为粘粒含量百分率, 当小于 3 或为砂土时, 均采用 3。

在采用碎石桩加固可液化地基初期, 人们对碎石桩复合地基抗地震液化的作用还没有进行更深入地研究, 一般仍套用原来的设计方法, 首先按照复合地基承载力的要求进行设计, 再以抗地震液化进行校核。随着工程实践的增多, 发现建造在可液化地基上的大量低、多层建筑物, 基底压力一般不大, 按抗液化要求加固后的复合地基, 常能同时满足承载力和变形要求, 因此复合基的设计通常由抗液化要求控制。而这种以承载力要求进行的设计方法不能突出以抗液化设计为主的设计思路, 很难获得一个合理的设计方案。而且在抗液化的校核中只考虑了碎石桩对桩间土的挤密作用, 没有考虑桩体的排水减压和减震作用, 过于保守, 形成很大浪费。

3.2 按照抗液化的要求进行的设计

3.2.1 只考虑碎石桩的加密作用

目前, 在确定碎石桩桩间距时常采用下面公式:

正三角布桩时

$$L = 0.952D \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (5)$$

正方形布桩时

$$L = 0.886D \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (6)$$

式中: D 为碎石桩直径; 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。

从上述公式可以看出, 桩间距的确定需要知道 e_0 、 e_1 这两个参数, e_0 可由室内测得, 现行规范通过标准贯入试验锤击数来判断土层是否达到液化。设计时可以假设加固处理后桩间土要求达到的孔隙比 (e_1) 就是土层达到液化临界标贯击数 (N_{cr}) 的孔隙比。由各国学者建立的标准贯击数和相对密度关系的经验公式^[3,9,10], 我们可以得到临界相对密度, 进而可以确定临界孔隙比, 由式(5)或式(6)即可确定桩间距 L 。

上面公式是假定加固土层没有流失, 且仅发生侧向位移, 不发生竖向应变, 即成桩后地面不隆起也不下沉。但是, 大量的工程经验表明, 在不同土质情况下, 振动成桩后桩间土体有时隆起, 有时下沉。对于一般可液化砂土和粉土地基上采用振动碎石桩加固时, 地面均发生不同程度的下沉, 只有在某些塑性指数较大的粉质粘土或粘土地基上采用碎石桩时, 才可能会有少量的地面隆起。在振冲法施工中, 桩体围内部分土颗粒将被高压水冲至孔外; 随水流带走或淤在地表面, 少量悬浮土粒被挟填于桩体孔隙中, 所流失的土颗粒不起加固作用, 这些影响加密效果的因素在设计时都应该考虑^[11,12]。

这样的设计方法突出了以抗地震为主的设计思路, 设计结果较前种方法合理。但一个合理的碎石桩复合地基抗液化的设计方案, 除了要满足地基承载力、变形和抗液化三方面的要求外, 单位面积的造价亦应最低。前已述及, 国内外现有的研究成果已经表明碎石桩防治地基液化不仅仅是加密作用, 而是加密、排水和减震等综合作用的结果。在保证一定密实度的前提下, 碎石桩的排水和减震作用也不容忽视。而当前最常用的这种设计方法仍基于考察加固处理后桩间土的液化可能性, 认为只要经过加固后桩间不发生液化, 整个复合地基的抗液化能力就得到保证, 忽略了桩体排水减压和减震的有利作用。这种设计方法虽然简单实用, 但由此形成的设计方案过于保守, 造成很大的浪费。在采用干振法施工中还可能由于设计的桩间距过小, 在施工后期发生严重挤土现象而造成无法按原来设计的桩间距贯入钢管的问题。出现沉管困难的情况就必须修改原设计方案, 大幅度增大桩距, 这样势必使加固后的

地基桩土置换率有较大的差异,给工程安全带来隐患。如果在进行碎石桩的抗液化设计时能综合考虑桩体的排水减压和减震的有利作用,形成的设计方案更趋向合理化,不仅可以抵抗地震液化,还可以降低工程的造价,使施工顺利进行。

3.2.2 考虑碎石桩多种抗液化作用的设计方法

近年来一些学者注意到碎石桩抗液化的多种作用,提出考虑多种抗液化作用的设计方法。根据振冲碎石桩复合地基抗地震液化的作用,以及目前判别碎石桩复合地基液化势的若干研究,何广讷基于当量标贯法,将碎石桩复合地基抗液化的主要功效近似量化,并考虑一定的安全储备。在所建立的当量标贯判别法的基础上,进一步形成以抗地层液化为目的的振冲碎石桩复合地基的设计^[3]。

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击数临界值 $(N_{cr})_F$ 可以表示为

$$(N_{cr})_F = \eta_u \eta_k N_{cr} \quad (7)$$

式中: η_u 为碎石桩复合地基排水减压功效的液化消减系数; η_k 为桩体应力集中效应的减震系数; N_{cr} 为桩间土液化判别处的标准贯入锤击数临界值,仍可由式(4)计算得到。何广讷^[3]根据日本柳堀羲彦等人^[13]的试验研究结果对 η_u 进行近似量化

$$\eta_u = 0.57k_1 \left(\frac{1}{mI}\right)^{1/2} \quad (8)$$

式中: m 为碎石桩复合地基的置换率; I 为加固场地的地震烈度; k_1 为桩体排水减压效应的分项安全系数,一般可取1.0~1.5。

复合地基中桩土共同承担地震力,碎石桩和桩间土上的应力按照刚度分配时,桩体应力集中效应的减震系数 η_k 可由下式计算

$$\eta_k = k_2 \frac{\tau_s}{\tau} = k_2 \frac{1}{1+m(n-1)} \quad (9)$$

式中: τ_s 为作用在桩间土上的地震剪应力; τ 为作用在复合地基上的地震剪应力; n 为桩土应力比; k_2 为桩体应力集中效应的分项安全系数,取1.1~1.3。

由此,碎石桩复合地基所需满足的液化判别标准贯入锤击数临界值 $(N_{cr})_F$ 为

$$(N_{cr})_F = \eta_u \eta_k N_{cr} = \frac{0.57k_1 k_2}{1+(n-1)} \left(\frac{1}{mI}\right)^{1/2} \cdot N_{cr} \quad (10)$$

设计时结合原场地土的密实度、标准贯入击数,通过土的密实度与其标准贯入击数之间的经验关系式^[3,9,10],可以获得该判别处土的抗液化临界孔隙

比。假设加固处理后桩间土要求达到的孔隙比 $(e_1)_F$ 就是土层达到液化临界标贯击数 $(N_{cr})_F$ 的孔隙比。则在综合考虑碎石桩复合地基多种抗液化作用时,桩间距的计算公式为

正三角形布桩时

$$L = 0.952D \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-(e_1)_F}} \quad (11)$$

正方形布桩时

$$L = 0.886D \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-(e_1)_F}} \quad (12)$$

这种以消除地震液化为主要目的碎石桩复合地基的设计法,充分考虑了碎石桩复合地基抗液化的多种作用,量化并给予适当的安全储备,获得了有关的各功效系数,可以更切合实际,突出抗地震液化的作用,使设计既保证安全,又更为经济。但其理论上的合理性和实用中的可靠性还没有得到充分的论证和检验。其中,复合地基排水减压功效的液化消减系数 η_u 仅仅根据一次试验结果得到,可靠度不高,今后应该在这方面加强试验研究,以取得可统计的数据,提高该系数的可靠度。在计算桩体应力集中效应的减震系数 η_k 时桩土应力比的正确选用存在着一定的困难。另外,虽然这种设计方法只是针对振冲碎石桩复合地基提出的,由前面的分析可以看到,可以推广至碎石桩复合地基。但值得一提的是,式(11)、式(12)是在假定加固土层没有流失,且仅发生侧向位移,不发生竖向应变,即成桩后地面不隆起也不下沉的条件下得到的,对不同的施工工艺,应该考虑土层的流失比和竖向变形,限于篇幅,详细推导过程本文不在此列出,考虑流失比和竖向变形时可参照文献[11,12]进行。

4 结论

1) 碎石桩复合地基是通过增加桩周土体密实度、桩体的排水减压和桩体减震的共同作用来减轻或消除地基地震液化的。

2) 在碎石桩复合地基的抗液化设计中要突出抗液化为主的设计思路,同时要综合考虑多种抗液化作用。这样形成的设计方案既可以保证安全,又更为经济合理,便于施工。

3) 我国目前碎石桩复合地基的抗液化设计方法仍然是只考虑加密作用,要想形成一套成熟的考虑多种抗液化作用的设计方法,还需要在今后加强试验研究,积累大量的数据以供定量计算。

(下转第314页)

烧失量平均值分别为: 表层 57.58 %, 中层 62.02 %, 下层 43.77 %, 可定为泥炭或泥炭质土。但这种特殊土与典型泥炭或泥炭质土的工程性质有显著差异, 如此定名忽视了其特殊性。

在土体内部存在特殊的架空结构, 宏观上表现出比典型泥炭更高的压缩性和渗透性; 中低分解度及未完全分解的草本植物残体含量高表现出了比典型泥炭高出很多的 φ 值; 高含炭量表现出了较深的颜色及高烧失量。

综上所述, 笔者认为, 用纤维状泥炭或草炭来描述这种土较合适。“纤维状或草”反映出未完全分解草本植物残体含量高这一特点, 又间接表现出特有的架空结构; “炭”反映含炭量高的特点; 纤维状泥炭或草炭的定名抓住了此类土的主要特点, 但用草炭这一名称更加形象通俗、方便实用。

7 结 论

1) 草炭土的有机质含量、分解度是决定其物理、力学、水理性质的控制性因素。

2) 高有机质含量、中低分解度草炭土形成特殊的架空结构, 进而表现出天然孔隙比大、天然重度

小、渗透性强、压缩性高、抗剪强度高于一一般淤泥软土的特性。

3) 草炭土因其特殊的工程性质既不同于典型泥炭又不同于一般淤泥软土, 工程建设中应予重视。

4) 预压排水固结法为草炭土地基一种既经济又有效的地基加固措施。

5) 用草炭土这一名称给这类土定名既抓住了此类土的主要特点, 又形象生动、方便实用。

参 考 文 献

- 1 赵红艳, 等. 敦化泥炭矿物质组成的研究. 东北师范大学学报(自然科学版), 2002, 34(3): 77~80
- 2 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版). 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 1~29; 259~290
- 3 唐大雄, 等. 工程岩土学. 北京: 地质出版社, 1999. 78~89; 111~119
- 4 蒋忠信. 滇池泥炭土. 成都: 西南交通大学出版社, 1994. 32~55
- 5 赵红艳, 等. 敦化大桥泥炭有机质及其组分研究. 吉林农业大学学报, 2002, 24(3): 65~67

收稿日期: 2004-07-26

(上接第 310 页)

参 考 文 献

- 1 Ishihara K, Kawase Y, Nakajima M. Liquefaction characteristic of sand deposits at an oil tank site during the 1978 Miyagiken - oki Earthquake. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 97~111
- 2 Mitchell J K, Baxter C D P, Munson T C. Performance of improved ground during earthquakes. Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation, ASCE Geotechnical Special Publication, 1995. 1~36
- 3 何广讷. 振冲碎石桩复合地基. 北京: 人民交通出版社, 2001
- 4 Baez J I, Martin G R. Quantitative evaluation of stone column technique for earthquake liquefaction mitigation [A]. Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Balkema, Rotterdam, 1992. 1477~1483
- 5 Madhav M R, Arlekar J N. Dilation of granular piles in mitigating liquefaction of sand deposits [A]. Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. 1035
- 6 郑建国. 碎石桩复合地基液化判别方法的探讨. 工程勘察, 1999(2): 5~7
- 7 邱 钰, 刘松玉, 黄 卫. 沉管干振碎石桩对土层振动效应的试验研究. 中国公路学报, 2001, 14(4): 33~36
- 8 林本海, 谢定义. 复合地基的液化检验理论及其应用. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- 9 Skempton A W. Standard penetration and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. Geotechnique, 1986, 36(3): 425~447
- 10 王士杰, 张吉占, 杨路华. 标贯 N 值的归一化及与相对密度的关系. 工程勘察, 1998(2): 17~21
- 11 章连洋, 杜 坚, 祝龙根. 抗液化振冲挤密桩间距的实用计算. 勘察科学技术, 1993(1): 16~20
- 12 王士杰, 张吉占, 张 梅. 碎石桩的抗液化设计. 勘察科学技术, 1998(1): 8~13
- 13 柳堀義彦, 落合真, 等. 濑户水门置换砂の液化予測と対策. 土と基础, 1975, 23(6): 11~16

收稿日期: 2004-07-01