

水泥土桩复合地基变形控制中的若干问题探讨

秦建庆 陈建峰

(同济大学地下建筑与工程系,上海 200092)

【摘要】 按照变形控制设计水泥土桩复合地基已成为一种趋势。结合工程实践,对复合地基变形控制中的几个问题,如变化参数的复合地基、加固深厚层软土时桩长的确定、褥垫层等,进行了探讨。

【关键词】 变形控制;水泥土桩复合地基;变参数

【Abstract】 Based on the engineering experience of cement-soil composite foundation, it becomes more and more acceptable to design composite foundation in accordance with settlement control. In this paper several problems are studied, which conclude varying parameters for composite foundation, determination of pile length in deep soft soil, selection of cushion.

【Key words】 settlement control; cement-soil composite foundation; varying parameter

0 引言

水泥土搅拌法按照施工工艺,可将其分为浆液喷射法和粉体喷射法两种。前者形成深层搅拌桩,后者则形成了粉喷桩,二者统称为水泥土桩。经水泥土桩加固后形成了水泥土桩复合地基。在复合地基中,上部结构荷载由桩体和桩间土体共同承担,在变形上相互协调。影响复合地基特性的因素很多,有面积置换率、加固层厚度、水泥掺入量、原状土的性质、外掺固化剂的种类和数量、基础型式及外荷载的分布形式等。为了使得水泥土桩复合地基能够满足上部结构承载力和变形的要求,必须综合考虑上述因素,使设计达到最优化。

在对水泥土桩复合地基进行设计时,通常都是由复合地基承载力控制的,即根据承载力的要求,确定复合地基的各设计参数,如面积置换率、桩长(加固层厚度)等。在软土地区,越来越多的工程实践表明:对水泥土桩

复合地基按变形控制设计更为合理。因为如果建筑物沉降量过大,同样会影响到建筑物的正常使用。为有效地控制复合地基的变形,在参数的确定方面存在可进一步优化之处。

1 变参数设计

影响复合地基特性的主要因素是面积置换率、加固层厚度(或桩长)、桩体强度三个参数。在设计复合地基时,常将这三个参数设计为固定值。从控制变形和技术经济的角度,对同一场地,如果采用变化的参数,可使设计更加合理。本文从复合地基中的应力分布规律出发,提出了变化设计参数的基本思路。

1.1 复合地基附加应力的分布规律

水泥土桩的特性介于完全的刚性桩和柔性桩之间,桩体刚度随水泥掺入比的变化而不同。水泥土桩依靠桩周摩擦力和桩端阻力,把作用在桩体上的荷载传递给地基土体,

它本身也要产生变形。在分析水泥土桩桩身轴力及侧摩阻力的分布时,目前的方法有两种:一是现场试验,直接量测桩身轴力;另一种是数值计算。

图1、图2分别为水泥土桩单桩和单桩带台复合地基中桩身轴向应力分布规律,为现场试验时量测得到^[1]。可知,附加应力的分布均呈现桩顶最大、沿深度逐渐减小的分布。而且在水泥土桩复合地基中,外加荷载沿深度方向的传递是有界限的,超过界限深度后,附加应力的数值很小。这一界限深度即是复合地基中的有效桩长。

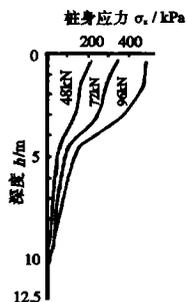


图1 单桩桩身应力沿深度的变化曲线

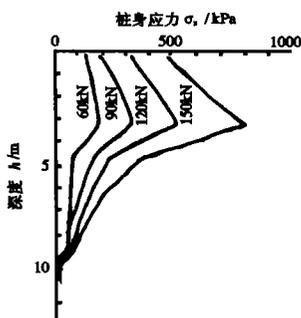


图2 单桩带台复合地基桩身应力沿深度的变化曲线

图3为有限元的计算结果^[2]。可见,在复合地基中,附加应力沿深度方向逐渐衰减,且复合地基中的附加应力要小于相应的天然地基。

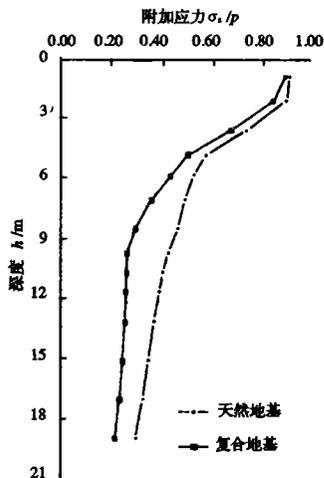


图3 附加应力的分布曲线

1.2 采用变化的桩长、置换率设计

根据复合地基中应力分布的特点,可采用变参数方法对复合地基进行优化设计。这是一种实用型设计思路,目的是从技术经济的角度使设计更加优化。当深度超过有效桩长后,复合地基的附加应力数值很小。对控制复合地基的变形而言,可以适当减小有效桩长以下部分的复合模量,即减小置换率,采用长短桩相结合来布桩,并仍能够满足上部结构对复合地基的承载力和变形控制的要求。利用长短桩相结合而形成的复合地基,从平面上是上部与下部采用了不同的置换率。因此,变化桩长,同时在深度方向上变化了面积置换率。

1.3 采用变化的桩体强度设计

根据水泥土桩桩身应力、侧摩阻力和变形的分布规律,对于水泥土桩本身,沿深度方向可以采用变化的桩体强度。因为沿水泥土桩的桩长方向,随深度增加,应力扩散增大,作用在桩上的附加应力将逐渐减小。同时,由于深部侧向压力的增大,对均质桩而言,顶部的压缩将远远大于底部的压缩。随深度增大,桩承载力的发挥程度越来越小。在水泥土桩复合地基载荷试验结束后,开挖发现,水

泥土桩的破坏以浅部的劈裂为主。因此,从理论上来说,要使得水泥土桩的设计更加经济合理,应使水泥掺入量沿桩身逐渐减小;这样,在荷载作用下,全桩长范围内桩的承载力能得到同水平发挥。

为实现桩体强度的变化,施工时在近地表一定深度范围内进行复喷浆、复搅,以提高顶部的水泥掺入量,增加桩体强度。对于复搅的深度,目前仍是一个值得进一步探讨的问题。复喷、复搅的深度要视加固区地层的分布、工程的特点而定。由上海地区的工程经验,对于均质土,复喷深度为基底下 $6\sim 8d$ (d 为桩的直径)。对于桩端有相对硬层的地基,应在硬层以上范围内复搅。

采用变化的桩长、置换率或桩体强度,其实质都是根据附加应力的传递特性,采取变化的模量,从而有效地控制变形。

1.4 工程实例

上海某住宅工程,为6层砖混结构,条形基础,基础埋深1.5m。场地的地层分布如表1所示。采用深层搅拌桩进行地基加固,桩长10.0m,桩径0.50m,为柱状加固方式。面积置换率为19.6%,水泥掺入比为12%。

表1 场地的地层分布

层序	地层名称	层厚 h/m	$E_{s_{1-2}}$ /MPa
①	素填土	2.00	
②	褐黄色粘土	1.50	3.90
③	灰色淤泥质粉质粘土	2.60~3.80	3.60
④	灰色淤泥质粘土	10.50~13.00	1.80
⑤ ₁	灰色粉质粘土	1.30~4.50	5.20
⑤ ₂	灰色砂质粉土	4.00	3.56

对水泥土桩复合地基按照规范的方法计算其沉降,沉降量为15.8cm。根据变化参数设计的思路,将其中1/3的桩改为8.0m。计算沉降量为14.9cm,更能满足建筑物对变形

的要求。与最初设计方案相比,节省造价约10%。

1.5 几种特例分析

根据基础型式、荷载分布形式和场地的地层分布,在进行复合地基设计时,可采用变化的设计参数。

(1) 场地地层分布不均匀时

以上海的软土地基为例。在软土层中存在许多暗浜,浜土的工程特性比周围土体差得多。若采用同一设计参数加固地基,浜区的加固效果将难以保证。可以在浜区内加密布桩,所增加部分的桩以穿透暗浜深度为准。这样,在浜区采取长短桩相结合的方法,增加了浜区的复合地基置换率,调整复合地基的刚度,达到协调建筑物变形的目的。

(2) 荷载分布不均匀时

对于体型复杂、荷载分布不均匀的建筑物,其对地基的差异沉降比较敏感,当采用水泥土桩进行地基加固时,对复合地基的设计就提出了更高的要求。设计的关键是建筑物各部分沉降变形的控制和协调,这可由桩长的变化和桩位布置来实现。

以福州市某工程为例,建筑物平面图见图4,为2层和4层楼组成的环条形综合楼,结构各部分荷载相差较大^[3]。

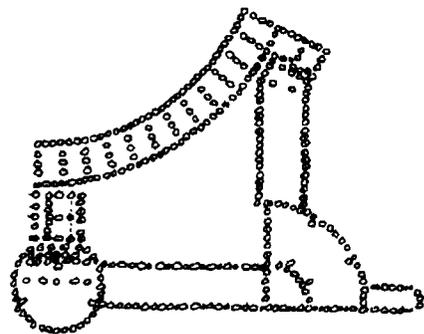


图4 建筑物平面及桩位布置示意图

场地地层以淤泥和带状分布淤泥为主,软土层厚度大于35m,并且分布不均匀。整

个建筑可分为6个部分,基础型式为片筏和大条形基础。搅拌桩沿墙下布置,各部分的桩长和桩数均不同。在确定施工参数时,采用变桩体强度的设计方法。施工过程中对搅拌桩的均匀性、桩身强度的抽检和竣工后对搅拌桩的静载荷试验结果均表明:施工符合设计要求,各部分复合地基的承载力也达到要求。

在上部结构施工过程中和竣工后一直进行沉降观测。由观测结果可知,整个结构竣工后的半年时间内,沉降量很小,最大值不超过60mm,且各相邻点的沉降基本上是协调的;从沉降发展趋势看已基本趋于稳定。这是水泥土桩应用于体型复杂、荷载不均匀的建筑下软土地基处理工程中的一个成功实例。

(3)基础型式

采用水泥土桩加固地基时,如果基础型式为片筏基础,一般按等距离布桩,但应验算上部荷载重心,调整基础底面积,以免建筑物出现偏心倾斜。

对于条形基础,当面积系数小时,由于荷载不是均匀分布的,因此一般不能均匀布桩;布桩基本原则是荷载多的地方多布,荷载少的地方少布;为充分发挥桩的侧摩阻力,宜采用柱状布桩方式。由于条形基础在纵横墙交接处及墙的转角部位会产生应力叠加,在这些部位需作一些特别处理。一种方法增加该部位的水泥土桩的桩长,或增加面积置换率;另一种方法是保持水泥土桩的设计参数不变,加大钢筋混凝土条形基础的底面积,以减少基底反力。工程实践证明,前者与后者相比,前者可节约造价,对控制变形达到良好的效果。

2 加固深厚层软土

当水泥土桩用于加固深厚层软土时,可通过增加桩长,控制变形量。如何确定一个合理的桩长,要视具体情况而定。水泥土桩复合地基中,其侧阻和端阻对单桩承载力的贡献是不同的。究竟如何取值,不论是现行规范还是相关文献,都没有明确而统一的规

定。有文献认为,取端阻值的一半,再加上侧阻即为水泥土桩单桩承载力标准值;还有的文献中倾向于将水泥土桩作为一种纯摩擦桩,不计桩端阻力。本文中的以控制变形为主的水泥土桩,考虑到存在临界桩长,将其视为纯摩擦型桩,更为合适些。

有限元的计算结果表明,当采用水泥土桩加固深厚层软土时,在固定桩长、增加置换率,和固定置换率、增加桩长两种情况下,后者控制变形的效果比较明显。

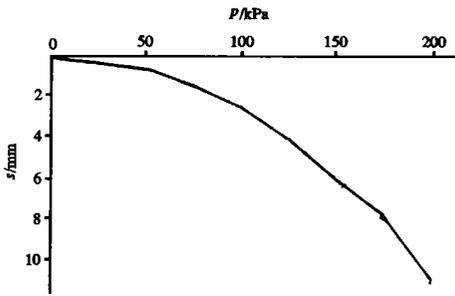
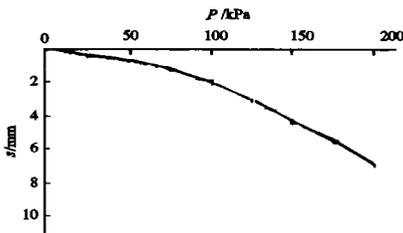
在加固深厚层软土时,桩身强度的选择也是不容忽视的。因为下卧层承载力较低,若桩身强度过大,水泥土桩的性质越接近于刚性桩,复合地基接近于桩基础。此时在桩端将产生高应力区,应力扩散不明显,下卧层的变形将增大,显然对控制建筑物的变形是不利的。这时采用相对较低的桩身强度、高置换率的布桩方式,可取得较好的效果。

但是,如果在深厚软土层中有相对硬层,且该硬层的埋深及厚度均相对合理时,应考虑将桩端落于该相对硬层上,然后再选择置换率。这种情况下,应将水泥土桩视为支撑摩擦型桩,在设计时可同时考虑桩的侧阻和端阻。但需要校核桩体的强度是否满足要求。一般情况下,充分地利用软土层中的相对硬层,可使复合地基的承载力达到最大,变形量最小,桩端未达到相对硬层或者穿过该层,加固效果均会有所降低。若相对硬层仅是分布在浅层,或者其厚度较小时,则不宜以此来确定加固层厚度。

3 褥垫层的设置

褥垫层是一种保证桩和桩间土变形协调、充分发挥桩和桩间土的承载力的有利手段。复合地基的基本工作性状是桩和桩间土的变形协调,充分发挥桩间土的作用,减少桩顶的应力集中。在设计时,应根据桩间土承载力、复合地基承载力、桩土应力比、桩顶标高等因素综合考虑褥垫层材料及厚度。

(下转 16 页)

图6 1号桩间土静压测点 $p-s$ 曲线图图7 2号桩间土静压测点 $p-s$ 曲线图

基础施工时,在底板上布置了12个沉降观测点,进行沉降观测,在主体结构完工时,其沉降量为13.40~20.00mm,倾斜值小于0.2%,满足设计要求。

5 结论

(1)任何一个地基方案取决于设计对承载力、变形的要求,取决于地质条件及周围环境因素,同时也要考虑造价、工期、施工条件等等。

(2)从工程实践中可知:中心压灌超流态CFG桩从施工工艺、成桩质量是一个很有发展前途的新工艺。

(3)在场地地质条件复杂,桩间土承载力低,采用振动沉管CFG桩挤密桩间土,采用中心压灌CFG桩控制变形是一个比较好的方法。

参 考 文 献

- 1 温立新,高贵普,贾财.北京某塔式住宅楼地基基础方案选优.岩土工程技术,1998(2):20~23

收稿日期:1998-11-08

(上接11页)

水泥土桩复合地基的褥垫层常选用级配良好的砂土。如何选择褥垫层的厚度是设计和施工中要注意的问题。若褥垫层厚度过小,桩间土承载能力不能充分发挥,要达到复合地基要求的承载力,必然要增加桩数或桩长,增加工程费用;若褥垫层厚度过大,桩间土的承载能力可以得到充分发挥,但桩承担的荷载将大大减小,桩土应力比接近或等于1,将会削弱复合地基中桩体的作用。这样就不利于提高复合地基的承载力,建筑物的沉降也不易得到控制。因此,应在总结大量工程实践的基础上,从技术经济的角度进行分析、比较,选择合理的褥垫层厚度。目前工程上一般采用10~30cm厚度。

4 结 语

对水泥土桩复合地基按变形控制进行设计,已成为一种趋势。本文探讨了变形控制中的几个问题,可供设计参考。

(1)分析了水泥土桩复合地基的工作机理,提出了采用变化参数的复合地基设计思路,从技术经济的角度使设计更加优化。

(2)当水泥土桩用于加固深厚层饱和软粘土时,需综合考虑地层分布及桩体强度,确定一合理的桩长,以控制复合地基的变形。

(3)设置合理的褥垫层,有利于控制复合地基的变形。

参 考 文 献

- 1 段继伟,龚晓南,曾国熙.水泥搅拌桩的荷载传递规律.岩土工程学报,1994(7)
- 2 秦建庆.水泥土桩复合地基变形特性与控制的研究:[学位论文].上海:同济大学,1998.
- 3 叶书麟,韩杰,叶观宝.地基处理与托换技术.北京:中国建筑工业出版社,1990
- 4 赖忠良.深层搅拌法在体型复杂荷载不均的建筑下软基处理工程中的应用.见:龚晓南等主编.中国土木工程学会地基处理学术委员会第三届地基处理学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1992

收稿日期:1998-11-08