

关于水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的探讨

杜文义, 蒙学礼

(核工业柳州工程勘察院, 广西柳州 545005)

摘要:通过工程实例,介绍了水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的理论计算,通过实际沉降观测数据推导出水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的实际值,并与天然地基的压缩模量进行对比,提出了水泥土搅拌桩复合地基压缩模量计算公式修正系数的概念。

关键词:水泥土搅拌桩;复合地基;压缩模量;修正系数

中图分类号:TU473.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)03-0054-04

Discussion of Compression Modulus of Composite Foundation of Cement-soil Mixed Pile/DU Wen-yi, MENG Xue-li (Liuzhou Engineering Investigation Institute of Uranium Geology, Liuzhou Guangxi 545005, China)

Abstract: The paper introduced the theoretical calculation of compression modulus of composite foundation of cement-soil mixed pile with an engineering case. The actual value of compression modulus of composite foundation of cement-soil mixed pile was derived by the observation data of actual settlement, and comparison was made to the compression modulus of natural ground. The concept of correction coefficient was put forward to calculation formula of compression modulus of composite foundation of cement-soil mixed pile.

Key words: cement-soil mixed pile; composite foundation; compression modulus; correction coefficient

水泥土搅拌桩复合地基是一种应用范围比较广泛的地基处理方法。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)规定的水泥土搅拌桩适用范围为“正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、粘性土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基”^[1]。由于该施工工艺具有施工效率高、成本低、施工占地面积小,无污染、无噪声、无震动,对邻近建筑物影响很小等特点^[2],在工程实际中应用比较多。因此,水泥土搅拌桩复合地基的沉降计算是一个很重要的工程问题。

1 水泥土搅拌桩复合地基沉降计算

按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)的有关规定^[3],应对水泥土搅拌桩复合地基的变形进行验算。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)把复合地基沉降量分为2部分,复合地基加固区压缩量 S_1 和下卧层(桩端下未加固土层)压缩量 S_2 ,即复合地基沉降量 $S = S_1 + S_2$ 。其中 S_1 可按复合模量法按规范(JGJ 79-2002)公式11.2.9-1进行计算, S_2 可按规范(GB 50007-2002)的有关规定进行计算。而水泥土搅拌桩复合地基的复合模量可按规范(JGJ 79-2002)11.2.9-2进行计

算。

JGJ 79-2002 公式 11.2.9-1:

$$S_1 = (p_z + p_{z1}) / (2E_{sp})$$

JGJ 79-2002 公式 11.2.9-2:

$$E_{sp} = mE_p + (1 - m)E_s$$

式中: p_z ——搅拌桩复合土层顶面的附加压力值, kPa; p_{z1} ——搅拌桩复合土层底面的附加压力值, kPa; E_{sp} ——搅拌桩复合土层顶面的压缩模量, kPa; E_p ——搅拌桩的压缩模量,可取 $(100 \sim 120)f_{cu}$, kPa; f_{cu} ——水泥土的标准强度, kPa; E_s ——搅拌桩复合地基桩间土的压缩模量; m ——搅拌桩复合地基的置换率。

由此可以看出,水泥土搅拌桩复合地基的沉降计算,最重要的是水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的确定。在此,通过一个工程实例,对水泥土搅拌桩复合地基的压缩模量进行计算,并将计算值与根据实际沉降数据推导得到的压缩模量进行对比和讨论。

2 工程实例

2.1 工程概况

柳州市某公司兴建“国美新村”住宅小区,共计

收稿日期:2010-10-09; 修回日期:2011-01-24

作者简介:杜文义(1966-),男(汉族),陕西三原人,核工业柳州工程勘察院副总工程师、工程师、注册一级建造师,化学工程专业,硕士,从事岩土工程设计与施工、行政与技术管理工作,广西柳州市荣军路317号,dwywh@sina.com;蒙学礼(1969-),男(汉族),广西金秀人,核工业柳州工程勘察院高级工程师、注册一级建造师,水文地质工程地质专业,从事岩土工程设计与施工、行政与技术管理工作,mx13023221@163.com。

19 栋楼。其中,1、7、18、19 号楼 4 栋建筑为“五同”建筑:同一建筑设计单位(广西商业建筑设计院)设计、同一监理单位(柳州正宇监理有限责任公司)监理、同一地质勘察单位(柳州市勘察测绘研究院)勘察、同一建筑施工单位(柳州市桂海建筑工程有限公司)施工(具体的施工队伍也相同)及相同的结构型式(独立柱基础型式+底层框架+5 层砖混结构型式)。唯一不同的是所采用的地基型式不同:1、7 号楼采用天然地基,地基持力层为硬塑状次生红粘土($f_{ak} = 210 \text{ kPa}$)和硬塑状红粘土($f_{ak} = 230 \text{ kPa}$),18、19 号楼采用水泥土搅拌桩复合地基(设计要求 $f_{spk} = 200 \text{ kPa}$)。

水泥土搅拌桩复合地基的设计和施工分别由建筑设计单位和我院完成,水泥土搅拌桩复合地基的静载荷试验由柳州市建设工程质量检测中心完成。

为了把水泥土搅拌桩复合地基与天然地基进行对比,建设单位要求建筑施工单位按照“定人定仪器设备”的原则,按规范的要求对 1、7、18、19 号楼 4 栋建筑进行沉降观测。4 栋建筑和沉降观测点的具体分布见图 1。

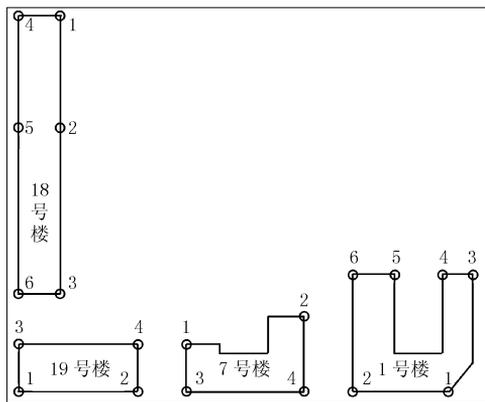


图 1 楼栋及沉降观测点分布示意图

2.2 场地简明工程地质条件

根据地质报告,场区地处柳东孤峰岩溶山前平原地带,原始地形为缓起伏土丘,局部积水成塘。勘察时皆已机械推填平整,时间超过 5 年。经过勘察,场区岩土层自上而下分述如下。

2.2.1 18、19 号楼

①杂填土:黄褐~灰褐色,主要为含碎砖石粘性土,局部为碎石灰渣,结构松散~稍密,为近期堆填而成,全场分布,层厚 1.3~2.3 m;

②淤泥及淤泥质土:深褐~青褐色,可~软塑或软~流塑状,含有机质,略具臭味,很湿~饱和,层厚 1.3~2.0 m, $f_{ak} = 110 \text{ kPa}$;

③表土:深黄褐色,软~可塑状,很湿,结构松散~稍密,含植物根系,易捏塑,层厚 0.8~2.5 m, $f_{ak} = 130 \text{ kPa}$;

④₁软塑状次生红粘土:黄褐色,结构稍密,土柱软,易捏塑,层厚 1.0~2.0 m, $f_{ak} = 130 \text{ kPa}$;

④₂可塑状次生红粘土:黄褐色,很湿,结构稍~中密,层厚 0.0~1.0 m, $f_{ak} = 160 \text{ kPa}$;

④₃硬塑状次生红粘土:黄褐色,结构紧密,土质均匀,场地内均匀分布,层厚 2.0~5.0 m, $f_{ak} = 210 \text{ kPa}$;

⑤₁硬塑状红粘土:黄褐色,硬塑状,结构紧密,土质均匀,全场均有分布,层厚 >5 m, $f_{ak} = 230 \text{ kPa}$ 。

2.2.2 1、7 号楼

①杂填土:黄~灰褐色,主要为含碎砖石粘性土,局部为石灰渣,结构松散~稍密,为近期堆填而成,层厚 $\leq 1.5 \text{ m}$;

④₃硬塑状次生红粘土:黄褐色,结构紧密,土质均匀,场地均匀分布,层厚 2.0~5.0 m, $f_{ak} = 210 \text{ kPa}$;

⑤₁硬塑状红粘土:黄褐色,硬塑状,结构紧密,土质均匀,层厚 >5 m, $f_{ak} = 230 \text{ kPa}$ 。

2.3 水泥土搅拌桩复合地基

2.3.1 设计方案

水泥土搅拌桩复合地基承载力特征值 $f_{spk} = 200 \text{ kPa}$,桩径 $\varnothing 500 \text{ mm}$,有效桩长 $l = 6.5 \sim 8.0 \text{ m}$ (进入持力层 0.5 m),水泥土标准强度 $f_{cu} = 1650 \text{ kPa}$,按 $0.8 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ 和 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的间距矩形布置搅拌桩,置换率 $m = 0.2722 \sim 0.3063$ 。

2.3.2 载荷试验结果

18 号楼进行了 3 点“双桩复合”的载荷试验、19 号楼进行了 3 点“四桩复合”的载荷试验,复合地基承载力特征值 f_{spk} 达到设计要求的 200 kPa,结果见表 1。

楼号	试验形式	试 点			平均值	承载力特征值
		1	2	3		
18	双桩复合	211	218	262	230	200
19	四桩复合	224	252	236	237	200

2.4 沉降观测结果

4 栋建筑在施工过程和使用过程中按规范规定进行了沉降观测:施工至 ± 0.00 时设置沉降观测点,以后每增加一层荷载观测一次。楼房竣工后,按规范规定的条件进行观测,直至沉降达到稳定,沉降观测最终结果见表 2。

表2 天然地基与水泥土搅拌桩复合地基沉降观测结果

楼号	观测点					地基沉降平均值/cm	承载力特征值/kPa	备注
	1	2	3	4	5			
1	0.60	0.70	0.60	0.50	0.50	0.70	210	天然地基
7	1.00	1.00	0.80	0.80				
18	1.20	0.90	0.90	1.10		0.87	200	复合地基
19	0.90	1.20	0.50	0.70	0.70			

3 水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的确定

3.1 压缩模量的理论计算

3.1.1 根据水泥土的标准强度进行计算

水泥土的标准强度根据室内试验取 $f_{cu} = 1650$ kPa, 置换率取 $m = 0.2722$, 搅拌桩的压缩模量取 $E_p = 100f_{cu} = 165$ MPa, 复合地基桩间土的压缩模量根据勘察报告综合取 $E_s = 5$ MPa。

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79 - 2002) 公式(11.2.9-2) $E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s$ 进行计算, 得出 $E_{sp} = 48$ MPa。

3.1.2 根据水泥土的实际强度进行计算

搅拌桩施工完成后, 开挖至设计桩顶标高, 在桩顶处钻取直径 ≥ 100 mm 的心样, 切割成高径比为 1:1 的试样进行水泥土桩身强度抗压试验, 得到水泥土的实际强度 f_{cu} 在 1.25 ~ 1.55 MPa 之间。如果取 $f_{cu} = 1250$ kPa 按规范(JGJ 79 - 2002) 公式(11.2.9-2) 进行计算, 得 $E_{sp} = 38$ MPa。

3.2 实际压缩模量的推导

以上述 1、7、18、19 号 4 栋建筑为例, 将复合地基和天然地基简化成如图 2 所示的模型。由于 4 栋

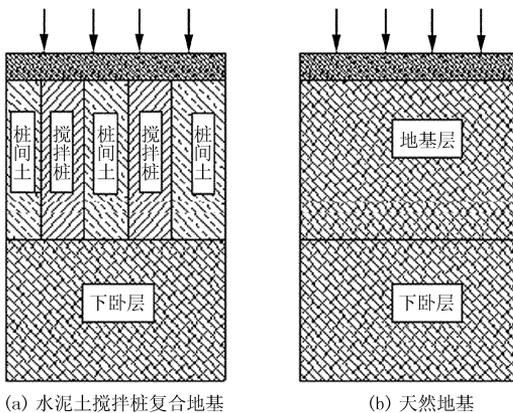


图2 复合地基和天然地基简化模型

建筑的上部结构和下卧层都是相同的, 可认为水泥土搅拌桩复合地基下卧层的变形 $S_{2\text{复合}}$ 与天然地基下卧层的变形 $S_{2\text{天然}}$ 相同, 从而得出“复合地基的最终变形(沉降) $S_{\text{复合}}$ 与天然地基的最终变形(沉降) $S_{\text{天然}}$ 之间的对比实际上反映的是水泥土搅拌桩复合

地基的变形(沉降) $S_{1\text{复合}}$ 与天然地基的变形(沉降) $S_{1\text{天然}}$ 之间的对比”的结论。

通过分析表 2 的沉降数据, 可以得出一个结论: 对于 1、7、18、19 号 4 栋建筑来讲, 水泥土搅拌桩复合地基与天然地基的沉降变形是相当的。根据上面的推导, 也可以得出“水泥土搅拌桩复合地基的实际压缩模量应该与天然地基的压缩模量相当”的结论。根据勘察报告, ④₃ 层硬塑状次生红粘土和 ⑤₁ 层硬塑状红粘土的压缩模量为 12 ~ 18 MPa, 所以水泥土搅拌桩复合地基的实际压缩模量也应该为 12 ~ 18 MPa。

比较基于以上方法得到的水泥土搅拌桩复合地基压缩模量, 发现理论计算值与实际推导值相差很多, 实际推导值只是理论计算值的 30% ~ 50%。

造成这种差别的原因, 龚晓南在其编著的《复合地基理论及工程应用》中认为^[4]: 通过规范(JGJ 79 - 2002) 公式(11.2.9-2) 计算复合地基的压缩模量, 是在等应变的前提条件下进行的, 即认为水泥土桩和桩间土在载荷作用下的应变是一样的。而在实际工程中, 不要说桩和桩间土的变形并不相同(根本无法满足等应变条件), 就是整个加固区(复合地基)也会产生侧向变形。桩土相对刚度越大, 桩和土的变形差距就越明显。这种实际存在的桩土变形差距造成了复合地基的实际压缩模量与通过规范公式计算出的理论值产生较大的误差。

笔者同意上述观点。从理论上讲, 地基土的压缩模量属于体积模量, 是由 3 个方向上的模量决定的; 而通过规范(JGJ 79 - 2002) 公式(11.2.9-2) 计算复合地基的压缩模量, 只是简单地用桩土面积比来加权平均计算复合地基的压缩模量, 这样就不可避免地造成理论计算值和实际值之间产生较大的误差。

因此, 笔者认为: 如果要采用规范(JGJ 79 - 2002) 公式(11.2.9-2) 计算复合地基压缩模量, 就应该对计算结果进行修正, 尽可能消除计算值和实际值之间的差别。这种修正, 可以通过完善理论模型来进行理论上的修正, 也可以通过工程实践经验数据进行经验修正。由此笔者建议引入修正系数的概念。

3.3 压缩模量的修正

根据上述对比分析, 笔者建议在利用规范(JGJ 79 - 2002) 公式(11.2.9-2) 计算水泥土搅拌桩复合地基的压缩模量时应考虑以下 2 点:

(1) 采用水泥土的实际强度通过公式(100 ~

120) f_{cu} 来计算水泥土桩体的压缩模量 E_p 。

水泥土的实际强度可通过在搅拌桩桩顶(设计标高)处钻取心样进行抗压试验的方法获得。

(2)增加一个修正系数 λ ,将公式变为:

$$E_{sp} = \lambda \cdot [mE_p + (1 - m)E_s]$$

修正系数 λ 可以通过工程实践经验数据获得。在柳州地区,修正系数可取 $\lambda = 0.3 \sim 0.5$ 。当桩间土的承载力 $f_{ak} \leq 100$ kPa时,取低值;当桩间土的承载力 $f_{ak} > 100$ kPa时,可取高值。

根据笔者的实际工程经验,在柳州地区,需要进行地基处理的场地可以简化为如下的简明工程地质条件:

第①层:软土,其承载力特征值一般为 $f_{ak} = 60 \sim 140$ kPa、压缩模量 $E_s = 4 \sim 6$ MPa,层厚 $6 \sim 12$ m;

第②层:可~硬塑状(红)粘土,其承载力特征值一般为 $f_{ak} = 180 \sim 230$ kPa、压缩模量 $E_s = 12 \sim 18$ MPa,第①层和第②层土层的总厚度一般为 $15 \sim 20$ m;

第③层:基岩。

第①层软土的种类包括新近回填的素填土、杂填土、流~软塑状的淤泥、软~可塑状的淤泥质粘土和软~可塑状的粉质粘土和(红)粘土等。

当采用水泥土搅拌桩进行地基处理时,水泥浆与第①层软土层反应以后形成的水泥土的实际强度一般为 $f_{cu} = 1000 \sim 2000$ kPa,常采用的搅拌桩置换率为 $m = 0.25 \sim 0.35$,处理后复合地基承载力特征值一般要求达到 $f_{spk} = 180 \sim 220$ kPa。

当取 $E_s = 5$ MPa、 $f_{cu} = 1500$ kPa、 $m = 0.3$ 时,通过修正后的公式计算出水泥土搅拌桩复合地基的压缩模量 $E_{sp} = 14.5 \sim 19.4$ MPa,该值与柳州地区常用的地基持力层——硬塑状红粘土的压缩模量(12~18 MPa)是相当的。

4 结论

通过上述工程实例的介绍论述,可以得出如下的结论:

(1)当利用规范(JGJ 79-2002)提供的公式进行水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的计算时,所得结果与通过沉降观测结果得到的压缩模量有较大的出入,必须对计算值进行修正。

(2)根据实际工程经验,在柳州地区,水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的修正系数可取 $0.3 \sim 0.5$ 。

水泥土搅拌桩复合地基压缩模量的确定是一个复杂的综合问题,影响因素比较多。本文提出的修正系数,是笔者在实践经验基础上的归纳总结,并未在理论上进行分析和论证,不妥和错误之处请广大同行和专家批评指正。

参考文献:

- [1] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 江正荣. 地基与基础施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 260-265.
- [3] JGJ 50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [4] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. 119-125.

阿特拉斯·科普柯(上海)贸易有限公司新疆分公司盛大开业

本刊讯 2011年3月18日,阿特拉斯·科普柯(上海)贸易有限公司新疆分公司开业庆典在乌鲁木齐隆重举行。新疆分公司的成立将进一步加强公司的销售和服务网络,为新疆乃至周边省(市)的客户提供更快速、更有效的服务,同时这也是阿特拉斯·科普柯公司本地化战略中的重要布局之一。

阿特拉斯·科普柯公司高级副总裁兼建筑与矿山技术部总裁 Bjorn Rosengren 先生,建筑与矿山技术部大中华区客户中心总经理文扬之先生,乌鲁木齐市经济技术开发区副区长、经济技术开发区管委会副主任艾塞特·吾守尔先生,乌鲁木齐市经济技术开发区管委会招商局副局长德丽达尔女士,新疆维吾尔自治区安监局非煤矿山处副处长(金属矿山处)周麟先生,以及100多名新疆客户、媒体和阿特拉斯·科普柯公司员工共同出席了庆典。

Bjorn Rosengren 先生表示,“我们阿特拉斯·科普柯,非常期望参与到经济蓬勃发展的中国市场中并为其做出贡献”。据了解,新疆石油资源量300亿t,天然气10万亿 m^3 ,分别占全国35%和34%,煤炭预测储量1.8万亿t,占全国40%;矿藏种类138种,占全国82%。新

疆已经成为工程机械企业的“香饽饽”。

作为全球领先的工业生产解决方案供应商,阿特拉斯·科普柯公司市场遍布近170个国家,产品和服务工程师遍布世界各地。“我们的成功建立在我们长期对客户恪守承诺,接近客户,理解客户面临的挑战并通过提供持续创新的产品开发和服务而满足客户的需求。” Bjorn Rosengren 先生说道。

目前,阿特拉斯·科普柯建筑与矿山技术领域在中国已经设立了3家客户中心以及5家工厂。2011年2月,阿特拉斯·科普柯决定在中国南京建立新的研发中心,这将增强阿特拉斯·科普柯在中国本土的设计和开发能力,并能为中国客户提供专门设计,满足特殊需要的产品。此外,将于2011年中期完成建立的新的物流中心,将很大程度上改善东南亚客户的产品和零件交付时间。

这些新机构的建立在阿特拉斯·科普柯发展过程中具有里程碑的意义,今天开业的新疆分公司也不例外,它将秉承满足客户需求的目标,在交货时间和业务便利性方面更加贴近客户,为中国、为新疆的客户提供无微不至的服务,并与建筑与矿山行业的客户们共同成长。