

粉喷桩复合地基沉降计算方法探讨

孔祥国

(长江大学城市建设学院,湖北荆州 434023)

【摘要】 复合地基变形计算准确与否,与选用的计算方法是否合适关系很大,各种计算方法都是从不同角度和假定模式上建立起来的,与实际工况存在差异。通过分析粉喷桩复合地基的工作机理和破坏机制,对现存的粉喷桩复合地基的各种沉降计算方法进行比较,提出了沉降计算方法的选用思路及改进方法。

【关键词】 粉喷桩;复合地基;沉降计算

【中图分类号】 TU 472.36

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.01.002

The Discussion About the Settlement Calculation of DJM Pile Composite Foundation

Kong Xiangguo

(Urban Construction Institute, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

【Abstract】 The settlement calculation accuracy of composite foundation is depended on the choice of the calculation method, the various types of calculation methods are established from different angles and hypothetical model, and it is the different between the actual working condition. The work of the mechanism and failure mechanism of DJM Pile composite Foundation are analyzed in the article, and various calculation method are compared, the ideas of selection and improvement method of the settlement calculation are put forward.

【Key words】 DJM pile; composite foundation; settlement calculation

0 引言

粉喷桩是用专用机械设备将软土地基中局部范围内的软土进行加固、改良而形成。粉喷桩与桩间软土形成复合地基,共同承受上部荷载。通常情况下,粉喷桩复合地基的抗压缩性能并不是特别好,在荷载作用下往往会产生较大沉降量,因此沉降计算显得尤为重要。而沉降计算准确与否,与选用的计算方法是否合适关系很大。复合地基沉降量通常分为加固区沉降量和下卧层沉降量二部分。加固区沉降量计算方法常用的有复合模量法、应力修正法和桩身压缩量法三种;加固区下卧层沉降计算常用的方法也有三种,即应力扩散法、等效实体法、改进 Geddes 法。这些计算方法都是建立在一定的本构模型基础上^[1-2],根据力学理论中应力与应变的关系确立的,计算中如果没有搞清计算模型的含义,任意选定计算方法,将会使计算结果与实测情况偏离很大,失去沉降计算在地基基础设计中的指导意义,甚

至造成工程事故。下面就对目前常用的粉喷桩复合地基沉降计算方法进行探讨。

1 粉喷桩复合地基的工作机理及破坏机制分析

复合地基中的粉喷桩是一种低强度桩,常用的加固剂是水泥。它借助空压机发出的压缩空气将水泥粉等加固材料进行喷射,并在需要加固的土层中进行压缩、原位搅拌和吸收水分,经过一系列化学和物理反应,形成具有一定强度的桩体,提高了地基的整体强度。改良后的加固土桩体有应力集中效应和置换作用,可以减少总沉降量,但没有考虑粉喷桩本身对地基的挤密作用和加快地基的排水固结作用。在正常置换率的情况下,桩分担了大部分外荷载,桩通过桩侧阻力和桩端阻力将荷载传到深层土中,从而提高了地基的承载力;同时复合地基对软弱下卧层来说具有垫层的扩散作用,减小了传到下卧层面的压力,也就减小了下卧层的变形。

粉喷桩单桩受力及破坏机制受桩身强度和复合

地基的面积置换率影响较大^[3],与刚性的混凝土桩有较大差别。试验结果分析显示,复合地基中粉喷桩的受力主要表现为摩擦型桩。当荷载相对较小时,作用在桩顶的应力使桩身上段首先产生变形,桩与桩周土产生相对位移,应力完全由二者间的侧摩阻力承担;随着荷载增大,桩侧摩阻力逐渐发挥,当应力足够大,达到地基土的比例极限时,桩侧摩阻力达到极限,不再增加,桩端土开始受力,并产生变形;此后所增加的应力主要由桩间土及桩端阻力共同承担,并随着应力的进一步增加,桩间土变形逐渐增大,最终桩端阻力也达到极限。这表明桩的强度和模量相对于桩间土较大,施加荷载的初期,土给桩的围压小,土中应力很小,基底应力主要向桩上集中,桩的强度先达到极限状态。随着压力的增加和时间的延长,土中有效应力得到增长,强度明显提高,土层承担其余的应力,直至发生破坏。因此在荷载作用下,粉喷桩复合地基的荷载传递是由上向下,由桩体向桩间土扩展的过程,桩的上部摩阻力发挥较充分,桩端阻力和深部的摩阻力则发挥不充分,桩的下部受力很小。一般来讲,桩身轴向应力呈衰减变化,最大轴向力位于桩顶 3~5 倍桩径范围内,以下部分轴向力则收敛很快。桩的破坏通常发生在上部 3~5 倍桩径范围内^[4],说明桩端只承担极小部分荷载,设计时可以忽略,因此水泥土桩的承载能力关键在于桩身强度,特别是浅层的桩身强度。规范^[5-6]规定,在粉喷桩复合地基设计中,宜使由桩身材料强度决定的单桩承载力大于由桩周土和桩端土的抗力提供的单桩承载力。由于桩身材料是水泥土,强度不是太高,故设计中,单桩承载力一般建议取 100~120 kN。在不增加水泥掺含量的情况下,增加粉喷桩桩长对提高粉喷桩单桩承载力并无多大贡献,只是对减小复合地基沉降起作用。

复合地基破坏模式可分为以下四种型式:刺入破坏、膨胀破坏、整体剪切破坏和滑动破坏。根据大量的现场静载荷试验结果分析发现,粉喷桩复合地基最可能发生的破坏模式是整体剪切破坏。即当复合地基中桩和桩间土相继达到其极限承载力后,增加荷载向加固体端部转移,使加固体以下的高应力区逐渐发展,直至复合地基深层出现整体剪切滑动面。伴随加固体整体剪切破坏而产生的地基沉降量是很大的,可以认为:粉喷桩复合地基的承载力最终只能由地基的变形条件控制,这也证实了粉喷桩按照相对变形法确定载荷试验地基承载力的正确性。

2 现行沉降计算方法对比分析

粉喷桩复合地基沉降计算采用的是分层总和法。该方法由于具有简便实用的特点,目前仍是工程设计中的主流方法。这种方法的不足之处有两个方面:一是设计计算参数的准确性问题。计算中所用参数主要是由压缩试验等室内试验提供,压缩试验指标的主要缺点是不能很好地考虑原位应力状态的影响,同时钻探取样扰动对其影响也很大,尤其是灵敏度较高的软土,使得试验参数准确度不够高^[7];二是计算模式的影响。每一种计算方法都是在假定模式上建立起来的,或多或少与实际情况有差异,因此选用计算方法时,要优先考虑计算模式是否与复合地基的工作机理、破坏机制相符或者接近。那么各种计算方法以及计算模式有何特点呢?下面将逐一进行探讨。

2.1 加固区沉降计算方法的分析比较

与其它复合地基相同,粉喷桩复合地基总沉降量 s 由上部加固区的沉降 s_1 和加固区底部下卧层的沉降 s_2 组成,即 $s = s_1 + s_2$ 。

加固区沉降 s_1 计算的三种方法中,复合模量法是将粉喷桩和桩间土看成变形等效的复合均质体,其计算表达式为:

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i H_i}{E_{cs_i}} \quad (1)$$

式中: Δp_i —第 i 层复合地基土上附加应力增量, kPa;

H_i —第 i 层复合地基土层的厚度, m;

E_{cs_i} —复合地基的压缩模量, MPa, 可通过面积加权法计算,也可通过室内试验测定,表达式为:

$$E_{cs_i} = mE_p + (1-m)E_s \quad (2)$$

式中: m —复合地基面积置换率;

E_p —桩体压缩模量, MPa;

E_s —桩间土压缩模量, MPa。

复合模量法在分层计算每一层复合土体的沉降量时,未考虑桩体和桩间土共同作用引起的复合模量的改变,复合模量实际上要比计算中按桩体模量和桩间土的面积加权之和,因此可以认为,复合模量法计算的结果是偏安全的。但也应该注意粉喷桩面积置换率 m 的改变对结果的影响。从公式(2)中分析,当置换率 m 较大时,复合地基的压缩模量 E_{cs_i} 大小主要由粉喷桩的模量决定,复合地基的压缩模量较大,承载力较高,加固区的沉降量 s_1 较小,此时复合地基的破坏模式表现为整体剪切破坏。

当置换率 m 较小时,复合地基的压缩模量 E_{cs_i}

大小主要由桩间土的模量决定,复合地基的压缩模量不大,承载力不高,加固区的沉降量 s_1 较大。此时复合地基中粉喷桩单桩受力及破坏机理与刚性的混凝土桩有相似之处,表现为单桩的刺入破坏,从而导致复合地基的破坏。所以对于低强度的复合地基,加固区的变形量 s_1 可视为桩身压缩量 s_p 和桩端相对于土的贯入变形量 Δ 两者之和。即:

$$s_1 = s_p + \Delta \quad (3)$$

桩身压缩量 s_p 可采用弹性理论中杆件压缩公式计算:

$$s_p = \frac{Q_p L_p}{E_p A_p} \quad (4)$$

式中: Q_p —作用于桩顶的竖向荷载, kN;

L_p —桩长, m;

A_p —桩身截面面积, m^2 。

桩端的贯入变形量 Δ , 是桩端处桩周侧摩阻力达到极限值后出现的塑性滑移刺入变形, 这是个难以确定的量, 与粉喷桩自身的强度以及桩端土的工程性质等因素相关, 目前还没有一个计算公式能全面地表达它的大小, 但是分析和试验均表明, 复合地基中桩端的贯入变形是存在的。设计中, 可取粉喷桩达到极限承载力时所需的桩土间相对位移作为桩端的贯入变形量。则粉喷桩复合地基总的沉降量 s 为:

$$s = s_1 + s_2 = s_p + \Delta + s_2 \quad (5)$$

应力修正法是根据桩间土分担的荷载, 按照桩间土的压缩模量, 忽略粉喷桩的存在, 用分层总和法来计算加固区压缩量的。该算法的关键是确定桩土应力比, 而影响桩土应力比的因素很多, 很难确定一个合理的桩土应力比值; 另外, 由于忽略了桩体的存在, 使计算值往往偏大。在计算中, 如果粉喷桩的面积置换 m 较小, 且对桩土应力比取值有经验, 则可用该方法计算加固区沉降量 s_1 。

桩身压缩量法则假定复合地基中粉喷桩在荷载作用下不产生刺入下卧层的变形, 并给定桩侧摩阻力的分布形式, 再根据粉喷桩所分担的荷载以及其压缩模量, 用公式(4)计算桩体的压缩量, 并认为桩体压缩量等同于加固区沉降量。三个因素将影响计算的准确性: 首先, 桩身压缩量法同应力修正法一样, 需要用桩土应力比来确定桩体分担的荷载, 这是一个难点, 合理的桩土应力比值很难判断; 其二, 假定复合地基中粉喷桩不产生刺入下卧层的变形本身并不合理。粉喷桩是摩擦型桩, 多数情况下, 桩端土也很软弱, 贯入变形量 Δ 是存在的; 其三, 桩侧摩阻

力的分布对计算结果影响很大, 而其分布存在较多的不定因素, 工程中该计算方法应慎用。

以上三种加固区沉降 s_1 的计算, 都是在一定假设条件下建立的近似计算方法, 从分析及实用效果看, 复合模量法比另外两种方法更可行。

2.2 加固区下卧层沉降计算方法的分析比较

复合地基变形计算的准确度很大程度上取决于加固区下卧层的变形计算^[7-8]。加固区下卧层沉降计算通常采用分层总和法, 计算的关键是准确确定作用于下卧层顶面的附加应力分布。在粉喷桩复合地基的设计计算中也有三种计算方法, 即应力扩散法、等效实体法和改进 Geddes 法。

应力扩散法认为作用于复合地基上的荷载按一定的扩散角传至下卧层顶面, 从而获得作用于下卧层顶面的平均应力及相应作用范围, 并由 Boussinesq 法求出下卧层内附加应力, 然后用分层总和法计算下卧层的沉降量 s_2 。计算中确定应力扩散角是关键。研究发现: 复合地基中高应力区比双层地基中深, 而双层地基中高应力区比复合地基中宽, 即双层地基的应力扩散作用比复合地基效果好。资料显示, 当模量比一定时, 双层地基的应力扩散角随着 H/B 的增大而增大, 复合地基的扩散角随着 H/B 的增大先增大后减小。在 H/B 相同时, 双层地基的扩散角远比复合地基的扩散角大, 且随着 H/B 的增大这种差距增大。当模量比变化时, 双层地基中应力扩散角随着模量比的增大而迅速增大, 而复合地基的扩散角随模量比的变化幅度稍有减小^[9]。因此, 如按常规的应力扩散角计算下卧层顶面的附加应力, 可能会比实际的附加应力小, 计算的沉降量 s_2 偏小。

等效实体法是将复合地基视为一等效实体, 加固区周边承受土层传来的向上的摩擦力, 等效实体底面处的附加应力为顶部荷载减去此深度以上加固区周边摩阻力后, 除以加固区底面面积, 这样就得到了作用于下卧层顶面的平均附加应力, 并据此计算下卧层土中的附加应力。其中问题的关键是确定等效实体四周的侧摩阻力, 事实上等效实体作为一分离体, 四周侧面上的剪应力分布是很复杂的, 很难做出一个合理的估计, 计算准确性难以控制。

改进 Geddes 法则是假设复合地基所受荷载按桩土应力比分配给桩和桩间土。将桩侧阻力简化为沿轴线的若干集中力作用于桩周土上, 将作用于桩端土的压应力也简化为一集中荷载, 并给出各自在土中产生的竖向应力表达式。桩间土分担的荷载在

地基中产生的竖向应力计算与天然地基中应力计算方法相同,加固区及下卧层内任一点的附加应力为这两部分产生的应力叠加,地基土的变形由叠加后的附加应力共同产生。再用分层总和法求出加固区及下卧层的压缩变形,两者之和即为复合地基总的沉降。

三种计算下卧层沉降量的方法采用了不同的假定模式。改进 Geddes 法将桩端土压应力及桩侧阻力都简化为集中力分别作用于桩端土和桩周土上,并假定桩侧阻力沿深度呈矩形和正三角形分布^[10]。这种计算方法虽然考虑了复合地基中桩的承载特性,但可操作性不强,其合理性也有待进一步研究,对粉喷桩来讲,缺乏针对性。应力扩散法实际上是地基规范中验算下卧层承载力的借用,但其扩散角的选定是近似的,存在一定的误差;而等效实体法因桩土复合体周边摩阻力分布、大小都不易确定,计算结果也有偏差。

3 计算方法的选择与改进

3.1 沉降量计算方法的选择

在加固区沉降量 s_1 的三种计算方法中,复合模量法从总体概念上将粉喷桩复合土体视为变形等效的复合均质土层,由此导出复合土层的压缩模量,再进行沉降计算。尽管面积置换率 m 对等效复合地基土层的均匀性有一定的影响,但总体上看,计算方法影响因素较少,概念明确,应用较方便,计算结果也比较接近实际,推荐采用。在加固区下卧层沉降 s_2 的计算中,应力扩散法和等效实体法是基于求出软弱下卧层顶面处的应力 p_b 大小及其作用范围,再按 Boussinesq 解计算下卧层中的附加应力,其计算模式与加固区沉降计算中复合模量法的计算模式有一致性,计算较为简便,也有一定的可靠度,推荐采用。

3.2 加固区下卧层的沉降量计算方法改进

在按应力扩散法、等效实体法计算加固区下卧层沉降时,由于 Boussinesq 解是以荷载作用在半空间弹性体表面为条件推得的^[11],而实际上下卧层顶面荷载作用于土中一定深度,这与 Boussinesq 问题有很大的差别。计算时可以将下卧层顶面以上复合土层两侧的土压力折减后作为超载 q ,按相邻基础考虑,用 Boussinesq 解分别计算软弱下卧层顶面处的附加应力 p_b 和 q 超载在下卧层中引起的附加应力,然后进行叠加,就可得下卧层中各点的附加应力,而后再计算地基的变形,计算简图见图 1。由于下卧层顶面以上复合土层两侧的土压力并非附加应力,故计算中需要折减后作为超载 q ;折减系数需要根据经验调整,一般可以取 0.1~0.3。

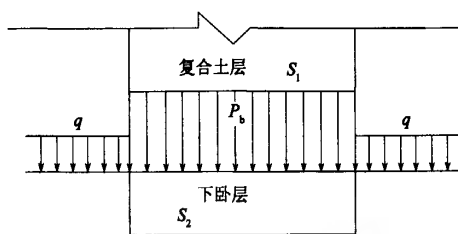


图 1 复合地基沉降计算简图

3.3 工程实例计算

为了便于比较,本文选用文献[8]中的实例资料进行计算。现将有关内容摘录如下:

上海某多层住宅小区采用粉喷桩加固地基,复合地基设计承载力 140 kPa,加固面积为 $74 \text{ m} \times 16 \text{ m}$,设计桩长 14.0 m,桩径 0.5 m,置换率为 15%,基础埋深 1.5 m,土层的概况见表 1。

表 1 土层概况

层号	土层名称	层厚 /m	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量 /MPa	承载力 /kPa
1	耕填土	1.5			
2	褐黄色粉质粘土	1.5	18.6	3.68	85
3	灰色粉土	1.5	18.7	8.79	90
4	灰色淤泥质粉质粘土	4	18.0	2.94	75
5	灰色淤泥质粘土	9.5	17.2	1.93	60
6	灰色粘土	1.5	17.5	2.74	70
7	灰色淤泥质粉质粘土	4.5	18.1	4.01	80
8	灰色粉质粘土	10	18.4	5.09	

采用复合模量法计算加固区沉降 s_1 ,其值为 73.7 mm,用改进后的应力扩散法计算加固区下卧层沉降量 s_2 ,其值为 175.6 mm,总沉降量 s 为 249.3 mm。与常规的计算结果相比,Esp 法^[8]: $s=238.8 \text{ mm}$ 。计算结果较为接近,其中 s_2 的计算结果比常规情况大,是超载 q 作用引起的。

4 结论

1)复合地基沉降计算方法都是在不同假定模式上建立起来的,与实际工况存在差异,选用计算方法时,要优先考虑计算模式是否与复合地基的工作机理、破坏机制相符或者接近。

2)在粉喷桩复合地基沉降计算中,采用复合模量法计算加固区沉降量;采用应力扩散法和等效实体法计算下卧层的沉降量,计算模式有一致性,方法简便,有一定的可靠度,推荐采用。

3)采用应力扩散法、等效实体法计算加固区下卧层沉降量时,可以将下卧层顶面以上两侧土层的

(下转第 19 页)

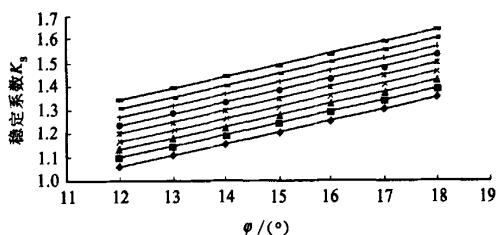


图3 土体内摩擦角敏感性分析

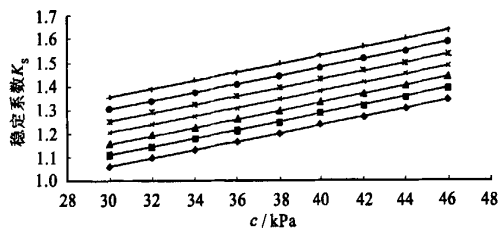


图4 土体粘聚力敏感性分析

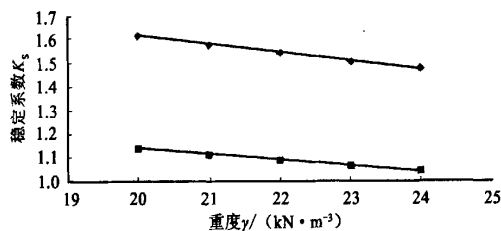


图5 土体重度敏感性分析

根据上述分析结果,稳定系数 K_s 随内摩擦角及粘聚力的增大而增大,随重度的增大而减小。根据稳定系数随因素变化率可见,内摩擦角变化的影响最为显著,每增加 1° ,稳定系数增大 $0.047 \sim 0.051$,粘聚力及重度影响相对较小,分别为每增加 1 kPa ,稳定系数增大 $0.0175 \sim 0.018$,每增加 1 kN/m^3 ,

稳定系数减小 $0.021 \sim 0.04$ 。

5 结论及建议

1)介绍了王家包滑坡的基本特征,分析了滑坡成因机制,探讨了各种机制的作用机理。

2)通过滑坡体主要变形迹象,定性分析了滑坡的稳定状态;采用极限平衡分析传递系数法对滑坡整体稳定性进行了定量计算表明,滑坡在三种工况下处于基本稳定—稳定状态。

3)对滑坡体稳定性影响因素的敏感性分析表明,土体内摩擦角对滑坡稳定性影响最为显著,土体粘聚力及重度对稳定性影响相对较小。

4)为保证滑坡长期稳定,建议对滑坡进行截排水防治、对前缘变形剧烈区域进行支挡治理。

参考文献

- [1] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析(原理·方法·程序)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [3] 时卫民,郑颖人,唐伯明. 滑坡稳定性评价方法的探讨[J]. 岩土力学,2003,24(4):545-552.
- [4] 刘传正. 论滑坡稳定性评价的几个关键问题[J]. 中国地质灾害与防治学报,1996,7(3):55-59.
- [5] 梁利喜,许强,刘天翔,等. 四川某滑坡成因机制分析及稳定性评价研究[J]. 水土保持研究,2007,14(2):189-193.
- [6] 张苏民,张旷成. 滑坡稳定性检算中几个问题的探讨[J]. 岩土工程技术,2008,22(6):271-276.

收稿日期:2009-10-19

(上接第9页)

土压力折减后作为超载 q ,按相邻基础考虑,然后计算软弱下卧层顶面处的附加应力 p_b 和 q 超载在下卧层中引起沉降量。该法计算思路清晰,可操作性强,准确度较高,建议在工程中采用。

参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [3] 韩春咏. 水泥搅拌桩复合地基沉降的影响因素分析[J]. 河北建筑工程学院学报,2008(4):6-8.
- [4] 胡雪梅. 基于粉喷桩复合地基沉降计算的探讨[J]. 岩土工程技术,2008(4):190-193.

- [5] 湖北省地方标准 DB42 建筑地基基础技术规范[s].
- [6] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[s].
- [7] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报,2008(4):679-685.
- [8] 王士杰,朱常志,等. 复合地基加固区下卧层的变形计算[J]. 河北农业大学学报,2008(6):118-121.
- [9] 倪红,邬陈玲. 搅拌桩复合地基沉降计算方法分析[J]. 工业建筑,2008(38):755-757.
- [10] 王伟,王士杰,等. 刚性桩复合地基沉降计算方法研究[J]. 土工基础,2008(1):36-39.
- [11] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.

收稿日期:2009-11-02