

公路路堤荷载下水泥搅拌桩复合地基的沉降计算分析

刘添俊 李彰明

(广东工业大学岩土技术开发中心 广州 510643)

摘要:根据公路路基承受柔性荷载的特点,采用弹性力学中 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解柔性荷载下水泥搅拌桩复合地基的应力分布及其沉降量,并考虑桩顶刺入变形对沉降量进行修正,通过工程实例计算证明本文的计算结果与实测结果能较好地吻合。

关键词:水泥搅拌桩; 桩顶刺入变形; 复合地基沉降; Mindlin 解; Boussinesq 解

1 前言

我国于 80 年代初开始采用水泥搅拌桩地基处理技术,目前已在高等级公路、市政工程、铁路、工业与民用建筑等的地基处理中得到广泛应用。相比之下,对这类复合地基计算理论的研究则明显滞后,导致其在软土地基加固中的应用仍存在一些问题,如设计计算方法不成熟,包括荷载传递性状、桩土共同作用机理、沉降量和承载力计算等。对于实际工程而言,地基处理后的承载力和沉降量是相互关联的两大重要指标,且前者往往受后者所制约,故地基沉降值的估算显得尤为重要。

本文结合广州大学城中环一标水泥搅拌桩加固路段的实测数据,对地基内附加应力及其沉降进行计算分析,并在充分考虑水泥搅拌桩复合地基实际受力和变形特征的基础上,运用弹性力学的 Mindlin 解和 Boussinesq 解计算复合地基的附加应力和沉降量,并考虑桩顶刺入变形因素的影响修正最终沉降量,从而提出既符合工程实际又较易获得相关参数的沉降计算方法。

2 复合地基附加应力与沉降计算

地基的沉降计算往往可归结为地基内附加应力的计算问题,由于水泥搅拌桩属柔性桩,其刚度受施工工艺和土层性质等诸多因素影响,导致其分析计算过程更趋复杂。在目前实际工程中通常是将复合地基加固区视为一匀质整体,同时采用复合模量和运用应力扩散法或等效实体法进行复合地基下卧层附加应力计算。但由于这一假设并未考虑桩顶和桩

端的刺入变形,故在计算公路路基柔性荷载下的搅拌桩复合地基变形时就难免出现偏离实际的结果。本文利用弹性力学中的 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解柔性荷载下搅拌桩复合地基及其下卧土层的应力分布。

2.1 桩侧摩阻力沿深度的传递特性

在采用 Mindlin 解计算桩侧摩阻力及桩端阻力对土中附加应力的影响时,首先必须了解桩侧摩阻力及桩端阻力的分布状况。根据有关研究成果^{[1][3]},在路基柔性荷载作用下,桩顶处桩侧摩阻力一般很小甚至为负值,最大值通常位于 3~5m 范围内,桩端阻力一般很小故可忽略不计。根据这一特征,可近似地假设桩侧摩阻力分布如图 1 所示,其最大值位于 $\frac{1}{3}H$ (桩长) 处,同时为便于计算,设桩顶和桩端侧摩阻力为零。另据研究结果^[9],计算中桩土应力比取 $n=3.0$,则 $\frac{1}{3}H$ 处的最大桩侧摩阻力 $q_{s\max}$ 为:

$$\pi R q_{s\max} H = P_p$$

$$q_{s\max} = P_p / (\pi R H) \quad (1)$$

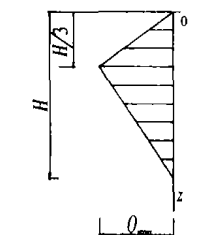


图 1 搅拌桩桩侧摩阻力分布示意图

式中: P_p 为桩顶荷载(kN); R 为桩的半径(m)。

2.2 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解法

复合地基任意一点的附加应力由桩顶荷载 P_p 和桩间土顶面荷载 P_s 两部分而产生,其中 $P_s = P_p/n$,它在地基内产生的竖向附加应力 σ_z 可用 Boussinesq 解求得,其计算方法与天然地基相同;而 P_p 在地基内产生的竖向附加应力 σ_z 则可用 Mindlin 解求得;将两部分应力迭加即形成该点附加应力 σ_z 。

当桩身 $\frac{1}{3}H$ 以上摩阻力呈线性分布时,任意深度 x 处的摩阻力 $q_1 = q_{s\max} x / (3H)$,而 $\frac{1}{3}H$ 至桩底、从桩顶往下任意深度 x 处的摩阻力 $q_2 = 2q_{s\max} (H-x) / (3H)$ 。

采用 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解方法计算概念明确,充分考虑了水泥土搅拌桩复合地基的实际受力和变形特征,模型合理,参数少且较易获得,对于实际工程的土工计算无疑具有极大的优势。考虑该法计算公式相对较复杂,且需手算的部分较多,为了简化计算,笔者采用 Compaq Visual Fortran 6.5 编制了相关的计算程序,其计算流程如图 2 所示。

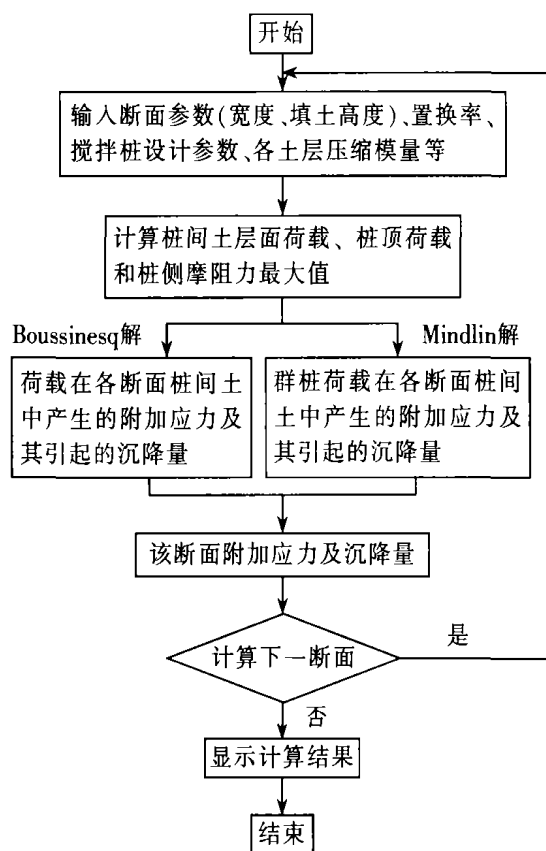


图2 联合求解法复合地基沉降计算流程图

2.3 考虑桩顶刺入变形修正最终沉降

在路堤荷载作用下的水泥搅拌桩复合地基属于基础下的半刚性桩复合地基,与刚性基础下的情况相比,其主要区别在于部分桩体将刺入基础中。另外对于柔性桩复合地基,只要设计桩长大于临界值,则桩底将不会出现竖向刺入变形^{[1][5]},因此桩侧地基土会产生如图 3 虚线所示的位移曲线。由于现有的水泥搅拌桩复合地基沉降计算未考虑桩顶的刺入变形,故对于刚性承台下的复合地基其计算结果尚能反映实际情况,但对于公路路基柔性荷载下的复合地基则其计算结果就有可能出现与实际不符的情况^[3]。

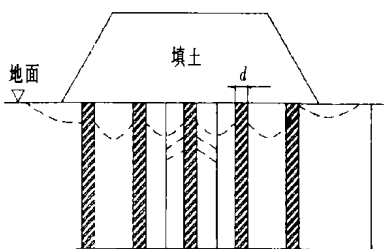


图3 桩体复合地基沉降变形图

为了考虑水泥搅拌桩桩顶的刺入变形,我们可按以下两种情况采用上述 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解法进行计算,即:①复合地基加固区采用复合模量,忽略桩顶刺入变形,计算相应沉降量 s_1 ; ②复合地基加固区采用提高后的桩间土模量,考虑桩顶刺入变形影响,计算相应沉降量 s_2 。在此基础上,采用 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解法计算最终沉降量 $s=A \cdot s_1+B \cdot s_2$ (A 、 B 分别为修正系数)。

3 工程实例

3.1 工程概况

为了检验本文方法计算的准确性,我们在广州大学城中环一标工程中选取了 6 个典型的监测断面(见表 1)进行沉降量监测,将其与计算结果进行比较。该路段软土厚度大多为 3~8m,主要采用水泥搅拌桩进行加固处理,桩长 $L=10$ m,桩径 1.2m,桩距 1.5m,穿过软土层并进入持力层。根据试验结果及相关资料,设桩土应力比为常量,即 $n=3$,桩侧摩阻力在桩身 $\frac{1}{3}H$ 处达到最大值。

表1 沉降量监测断面概况

公路 里程	填土 高度 (m)	泊松比	
		μ_1	μ_2
K0+150	2.6	0.25	0.30
K1+385	3.6	0.27	0.35
K1+620	2.2	0.25	0.32
K0+680	2.4	0.28	0.33
K1+510	2.0	0.26	0.31
K1+740	1.8	0.25	0.30

注) 填土重度为 17kPa/m。

3.2 计算参数的选取

本算例中各层土的重度、压缩模量等参数,是结合上海市政工程设计研究院提供的广州大学城(小谷围岛)中环路地质剖面土层与相关规范所取得。

3.3 附加应力的计算

将 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解与仅用 Boussinesq 求解的计算结果进行比较,其中 2 个断面的应力曲线比较如图 4 所示。

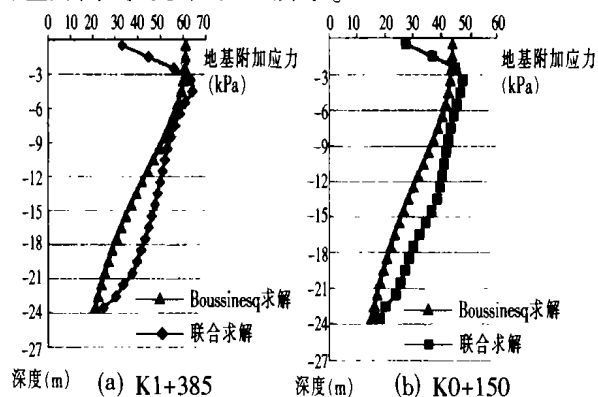


图4 复合地基附加应力随深度的变化

由此可见,采用联合求解法获得的复合地基附加应力曲线与天然地基采用 Boussinesq 法获得的曲线存在很大区别,主要表现在浅层应力大幅减小,这对软土地基是十分有利的。由于软土地基的承载力往往受到浅层软土不排水强度 C_u 较低的制约,而土的变形模量又随着地基土层深度增大而增大,因而桩土复合地基成为提高软土地基承载力和减小地基变形的有效方法。而桩端下卧土层的附加应力略有增大,但随深度的增大两条曲线很快重合,说明搅拌桩的作用有效减小了加固区的附加应力,并将附加应力向深层传递。

3.4 地基沉降计算

通过编制 Mindlin 解与 Boussinesq 解联合求解方法计算程序,对 6 个监测断面进行计算,求取道路中心处地面沉降量,搅拌桩的压缩模量取 50MPa,置换率为 15%,其计算结果见表 2。

表 2 沉降值计算结果

里程	处理深度 (m)	填土荷重 (kPa)	地面沉降量 (mm)		
			计算值 X_1	X_2	实测值
K0+150	10	44.2	126	210	149
K1+385	10	61.2	159	198	166
K1+620	10	37.4	104	155	125
K0+680	10	40.8	100	126	112
K1+510	10	34.0	90	110	96
K1+740	10	30.6	61	73	68

注) 计算值 X_1 、 X_2 为复合地基加固区的模量分别采用复合模量和提高后的桩间土模量。

3.5 修正系数 A 、 B 的求取

利用多元线性回归对上述数据进行统计分析,设地表面沉降实测值为随机变量 s , 它与两个普通变量即 X_1 、 X_2 有关,由此得到二元线性回归模型:

$$s = A X_1 + B X_2 + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \delta^2)$$

式中: A 、 B 、 δ^2 都是与 X_1 、 X_2 无关的未知参数,以表 2 的监测数据作为样本, 即有 (126, 210, 149)、(159, 198, 166)、(104, 155, 125)、(100, 126, 112)、(90, 100, 96)、(61, 73, 68)。用极大似然估计法进行估计,可求得 $A = \frac{2}{3}$, $B = \frac{1}{3}$, 故得出考虑刺入变形的沉降经验修正公式为: $s = \frac{2}{3} X_1 + \frac{1}{3} X_2$ 。

用其它监测数据对该公式进行验证, K0+250 修整后的沉降值 $s = \frac{2}{3} \times 130 + \frac{1}{3} \times 163 = 141\text{mm}$, 比实测值大 1.4%; K0+430 修整后的沉降值 $s = \frac{2}{3} \times 148 + \frac{1}{3} \times 192 = 163\text{mm}$, 比实测值大 1.9%。两者误差均小于 5%, 在工程计算可接受的范围内。

4 结论

4.1 联合求解法根据桩身荷载传递规律并考虑桩土应力比等因素, 因此其计算结果理论上应是较为符合实际的。

4.2 由于搅拌桩的作用有效地减少了加固区的附加应力, 并将该应力向深层传递, 从而增大了下卧层的沉降量, 因此采用水泥搅拌桩加固软基时应使桩打入至持力层以提高其加固效果。

4.3 由于实测沉降量介于两种情况下的联合解法计算结果之间, 若对桩顶刺入变形进行修正, 则其结果能与实际情况较好地吻合, 这说明在公路水泥搅拌桩复合地基的沉降计算中应考虑桩顶的刺入变形。

4.4 该法要求弄清桩身摩阻力分布与桩土应力比等情况, 而这些因素与桩土间刚度比及其相互作用等因素相关, 另该法基本假设为线弹性模型, 与土层实际情况会有出入, 但由于公路路基荷载不大, 故其影响相对较小。经综合考虑, 本文方法较能符合工程实际情况, 且计算方便快捷, 不失为一种有效和准确合理的实用方法。

参 考 文 献

- 1 段继伟, 龚晓南. 水泥搅拌桩的荷载传递规律. 岩土工程学报, 1994.7
- 2 桩基工程手册. 中国建筑工业出版社, 1995
- 3 哲学森著. 软土地基沉降计算. 北京: 人民交通出版社, 1998
- 4 华南理工大学等四院校合编. 地基及基础. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- 5 刘利民, 杨春林. 柔性桩复合地基沉降计算. 港口工程, 1997(1)
- 6 JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范
- 7 徐芝纶主编. 弹性力学. 北京: 高等教育出版社, 1996
- 8 姜弘道等译. 弹性力学核要与经典题解. 北京: 高等教育出版社, 1988
- 9 林琼. 水泥搅拌桩复合地基试验研究. 浙江大学硕士学位论文, 1989